CAPÍTULO 10

Control de Erosión en Taludes y Obras de Ingeniería

INTRODUCCIÓN

Para el diseño de las obras de control de la erosión en un talud debe realizarse un análisis muy completo de las condiciones geológicas, geotécnicas, hidrológicas y ambientales que permitan tener un conocimiento completo del comportamiento del talud después de construido. En el caso de requerirse la estabilización por problemas de deslizamientos o erosión activos se debe analizar los mecanismos de falla y cuantificar el desequilibrio. El análisis debe incluir los conocimientos de mecánica de suelos, geología, hidrología, etc., y la experiencia del manejo de otros taludes en condiciones similares.

La principal causa de los problemas en los taludes es la presencia del agua de la lluvia, la escorrentía y el agua subterránea, por lo tanto el manejo de las aguas es muy importante desde el inicio de la construcción. La protección de la superficie del terreno generalmente se obtiene utilizando la vegetación como obra principal de estabilización y se debe tener especial cuidado en la selección del sistema de establecimiento de la cobertura vegetal y de las especies vegetales a establecer; Sin embargo, en ocasiones se requieren obras con materiales no orgánicos para complementar la protección con vegetación. El planteamiento, diseño e implementación de las obras de control de erosión, requiere de un trabajo conjunto donde deben intervenir geólogos y ambientalistas, forestales y expertos en vegetación nativa y los ingenieros civiles, hidrólogos, hidráulicos, y geotécnicos.

Las obras de ingeniería involucran la intervención de laderas y taludes, los cuales requieren de un programa de control de erosión durante la construcción, y de medidas definitivas de control a mediano y largo plazo. La producción de sedimentos, ocasionada por la erosión requiere de obras de control de sedimentos. La erosión es una de las principales fuentes de contaminación del agua, y la construcción de obras de ingeniería es una de las principales fuentes de erosión.

En los países desarrollados existen normas muy estrictas de control de erosión que deben cumplir los constructores, para la protección del medio ambiente. En los países latinoamericanos se está empezando a trabajar en el control de erosión en construcciones y los ingenieros somos los responsables de su diseño e implementación.

Se debe crear inicialmente una conciencia de la importancia y necesidad de controlar la erosión y la sedimentación durante la construcción de una obra de ingeniería, para lo cual es muy importante conocer los problemas que se presentan y las metodologías para su solución.

10.1 DISEÑO DE TALUDES

El diseño de un talud debe incluir como mínimo los siguientes elementos:

a. Diseño de la forma del talud, pendientes, bermas, etc.
b. Diseño de las obras de manejo de aguas de escorrentía
c. Diseño de las obras de protección de la superficie del terreno.(Bioingeniería o recubrimientos)
d. Diseño de las obras de control geotécnico (Subdrenajes, muros y otros sistemas de estabilización que se requieran).

Pendiente del talud

Para el diseño de la pendiente del talud se debe analizar a detalle las condiciones de litología, estructura y meteorización de los materiales constitutivos del talud. El suelo y la roca son materiales extremadamente complicados y heterogéneos y tienden a deteriorarse con el tiempo. Los suelos residuales por la presencia de discontinuidades estructurales son especialmente difíciles de manejar (Figura 10.1).

Para decidir el valor de la pendiente y la forma del talud se debe realizar un juicio en conjunto, analizando la influencia de todos los factores. En este estudio se puede requerir realizar ensayos de laboratorio y análisis de estabilidad, utilizando modelamientos matemáticos y físicos.

El cálculo de factores de seguridad utilizando modelos matemáticos determinísticos como los de Fellenius, Bishop Janbú o tantos otros es una práctica de ingeniería muy utilizada; Sin embargo, no siempre se dispone de información geotécnica suficiente y se requiere utilizar criterios empíricos generales. El uso de sistemas semi-empíricos requiere de mucho cuidado especialmente si la experiencia no proviene de taludes en las mismas condiciones topográficas, climáticas y geotécnicas.

A continuación se presenta una tabla empírica de pendientes típicas utilizadas para taludes en cortes de carreteras.

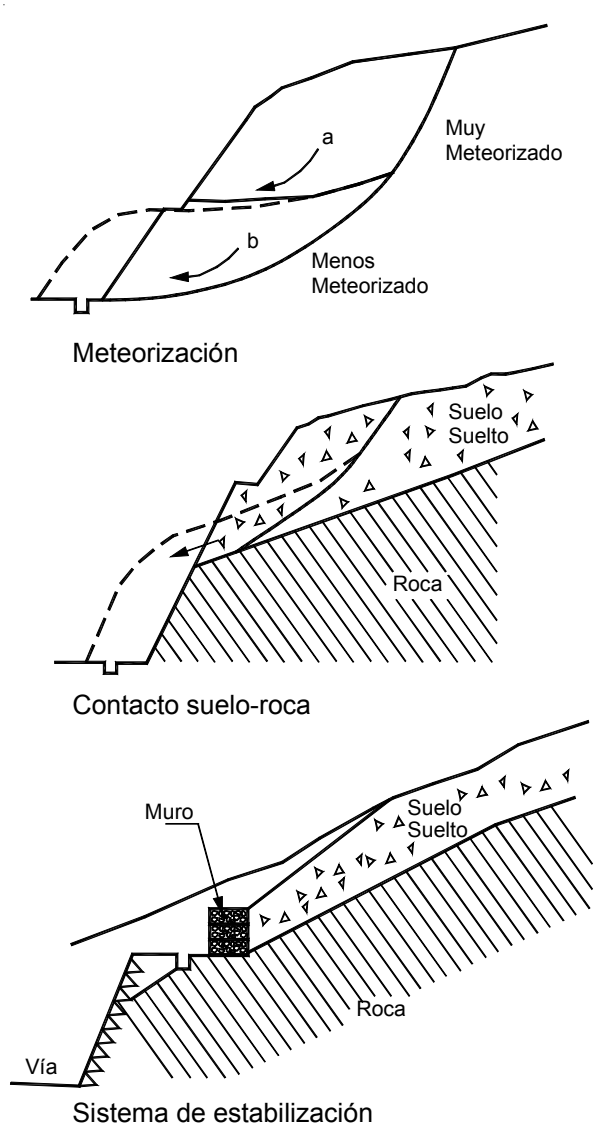


FIGURA 10.1 Fallas y estabilización en suelos residuales.

Para determinar la pendiente del talud, en ocasiones se utiliza la información de la velocidad de onda elástica (V_p) a través del material (Figura 10.2).

TABLA 10.1 Pendientes típicas para taludes en cortes de carreteras (Adaptada de Japan Road Association, 1984).

Material	Propiedades	Altura del corte (mt)	Pendiente Sugerida
Roca dura			0.3 H:1V a 0.8H:1V
Roca blanda			0.5H:1V a 1.2H:1V
Arena	Poco densa		1.5H:1V a 2H:1V
Suelo arenoso	Denso	Menos de 5	0.8H:1V a 1H:1V
		5 a 10	1H:1V a 1.2H:1V
	Poco denso	Menos de 5	1H:1V a 1.2H:1V
		5 a 10	1.2H:1V a 1.5H:1V
Mezcla de arena con grava o masas de roca	Densa	Menos de 10	0.8H:1V a 1H:1V
		10 a 15	1H:1V a 1.2H:1V
	Poco densa	Menos de 10	1H:1V a 1.2H:1V
		10 a 15	1.2H:1V a 1.5H:1V
Suelos cohesivos		0 a 10	0.8H:1V a 1.2H:1V
Suelos cohesivos mezclados con masas de roca o bloques		Menos de 5	1H:1V a 1.2H:1V
		5 a 10	1.2H:1V a 1.5H:1V

Taludes de pendiente combinada

En la mayoría de los casos la resistencia y calidad de los materiales varía de acuerdo a la profundidad de la excavación y se requiere tener en cuenta estas diferencias para definir la pendiente. La solución más utilizada es la construcción de pendientes combinadas de acuerdo a las características del material (Figura 10.3).

Bermas intermedias

Se debe construir bermas intermedias en los sitios de cambio de pendiente y en los sitios donde se requiera para garantizar un factor de seguridad adecuado contra deslizamiento. La localización y ancho de las bermas depende del propósito de las bermas.

1. Bermas para el manejo de aguas de escorrentía y control de erosión

Estas bermas generalmente tienen un ancho 1 a 2 metros y se colocan a diferencias de altura entre 5 y 10 metros, dependiendo de la calidad de los suelos y coincidiendo con sitios de cambio de pendiente del talud. En suelos erosionables la berma debe tener una pendiente de 5 a 10 % hacia adentro del talud y se debe construir una cuneta revestida en su parte interior para el control y manejo de las aguas de escorrentía. La pendiente longitudinal de la berma debe ser superior al 3 % para garantizar la salida eficiente y rápida del agua recolectada.

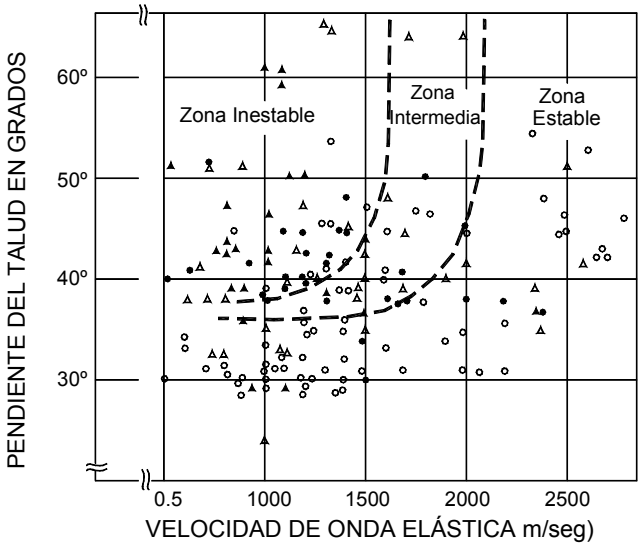


FIGURA 10.2 Taludes estables e inestables en roca de acuerdo a la velocidad de onda elástica (Japan Road Association, 1984).

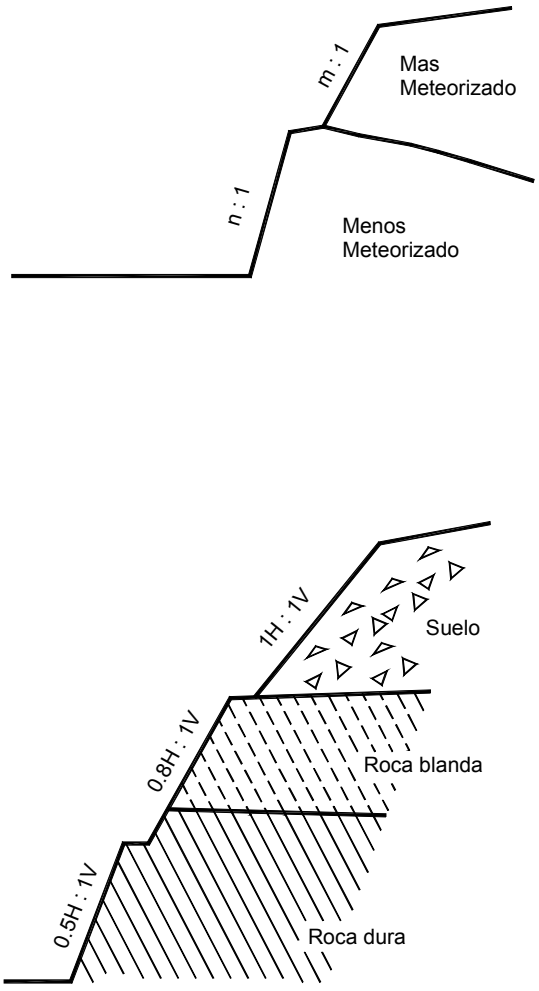


FIGURA 10.3 Pendientes variables de taludes en suelos residuales.

2. Bermas para aumentar el factor de seguridad contra deslizamiento

En ocasiones se requiere la construcción de bermas de gran ancho en suelos cohesivos para aumentar los factores de seguridad al deslizamiento. En suelos granulares (arenosos o gravosos) se debe preferir disminuir la pendiente del talud a construir bermas que pueden ser inestables por la pendiente del talud entre ellas.

La construcción de terrazas en la parte alta de un deslizamiento de rotación tiende a reducir el momento actuante y controlar el movimiento. Si el proceso se hace en la parte inferior se puede lograr el proceso inverso de disminuir el factor de seguridad. En deslizamiento de traslación y en ciertos flujos o deslizamientos de residuos, generalmente no es efectivo emplear métodos de remoción de materiales.

El efecto es el de disminuir las fuerzas actuantes, en la zona más crítica para la generación de momentos desestabilizantes. En esta forma el círculo crítico de falla se hace más profundo y más largo, aumentándose el factor de seguridad.

Al construir las terrazas el talud puede quedar dividido en varios taludes de comportamiento independiente, los cuales a su vez deben ser estables. El terraceo se le puede realizar con el propósito de controlar la erosión y facilitar el establecimiento de la vegetación. La altura de las gradas es generalmente, de 5 a 7 metros y cada grada debe tener una cuneta revestida para el control del agua superficial. El sistema de cunetas a su vez debe conducir a una estructura de recolección y entrega con sus respectivos elementos de disipación de energía.

En suelos residuales generalmente, la grada más alta debe tener una pendiente menor, teniendo en cuenta que el suelo subsuperficial es usualmente el menos resistente. Las terrazas generalmente, son muy útiles para control de aguas de escorrentía.

En todos los casos debe considerarse el efecto que se puede tener sobre los taludes arriba y abajo de la terraza a excavar.

Criterios generales para el diseño de bermas y pendientes

Para el diseño de bermas y pendientes se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

1. Formación Geológica

A mayor competencia de la roca se permiten mayores pendientes y mayores alturas. Las areniscas, calizas y rocas ígneas duras y sanas permiten taludes casi verticales y grandes alturas. Los esquistos y lutitas no permiten taludes verticales.

2. Meteorización

Al aumentar la meteorización se requieren taludes más tendidos, menores alturas entre bermas y mayor ancho de las gradas. Los materiales muy meteorizados requieren de taludes inferiores a 1H:1V, en la mayoría de las formaciones geológicas no permiten alturas entre bermas superiores a 7 metros y requieren anchos de berma de mínimo 4 metros.

Para cortes en materiales meteorizados la pendiente en la parte más profunda del corte permite ángulos superiores a la cabeza del talud. Se recomienda para cortes de gran altura establecer ángulos diferentes de pendiente para el pie y la cabeza del corte, adaptándolos a la intensidad del proceso de meteorización.

3. Microestructura y estructura geológica

A menos que las discontinuidades se encuentren bien cementadas, las pendientes de los taludes no deben tener ángulos superiores al buzamiento de las diaclasas o planos de estratificación. Entre menos espaciadas sean las discontinuidades se requieren pendientes menores de talud. Para materiales muy fracturados se requieren taludes, alturas y bermas similares a los que se recomiendan para materiales meteorizados (Figura 10.4).

4. Minerales de arcilla

Los suelos que contengan cantidades importantes de arcillas activas, tipo Montmorillonita, requieren de pendientes de talud inferiores a 2H:1V. Los suelos con Kaolinita permiten generalmente, taludes hasta 1H:1V. Las alturas entre bermas en suelos arcillosos no deben ser superiores a 5 metros y las gradas deben tener un ancho mínimo de 4 metros.

5. Niveles freáticos y comportamiento hidrológico

Los suelos saturados no permiten taludes superiores a 2H:1V a menos que tengan una cohesión alta.

6. Sismicidad

En zonas de amenaza sísmica alta no se deben construir taludes semiverticales o de pendientes superiores a 1/2H:1V, a menos que se trate de rocas muy sanas.

7. Factores antrópicos

En zonas urbanas no se recomienda construir taludes con pendientes superiores a 1H:1V y las alturas entre bermas no deben ser superiores a 5 metros.

8. Elementos en riesgo

Los taludes con riesgo de vidas humanas deben tener factores de seguridad más altos.

Soluciones a problemas específicos de estabilidad

a. Cambios bruscos de litología

Cuando ocurren cambios bruscos de litología por la presencia de coluviones, mantos de suelos blandos o perfiles muy meteorizados, se puede requerir construir una berma ancha en el sitio de cambio de litología y la construcción de estructuras de estabilización en la berma.

b. Presencia de estructuras heredadas

Los mantos de roca y los suelos residuales poseen una gran cantidad de fracturas o superficies de debilidad, en este caso las pendientes de los taludes

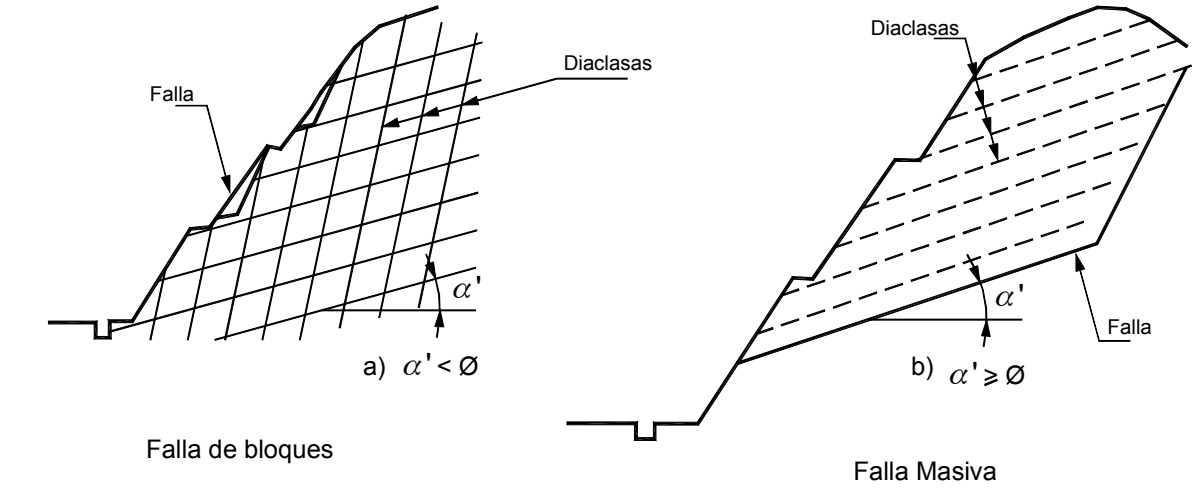


FIGURA 10.4 Modos de falla en taludes de roca fracturadas.

deben ser determinadas por la localización y buzamiento de las fracturas. En ocasiones cuando aparecen estratos muy blandos se puede requerir tender el talud por el plano de estratificación.

c. Presencia de niveles freáticos

Cuando existen niveles freáticos dentro de talud se requiere pendientes muy suaves en la zona saturada o la construcción de sistemas de subdrenaje profundo (previamente a la realización del corte).

d. Taludes de gran altura

Los cortes de alturas muy grandes pueden producir fallas catastróficas y se deben realizar estudios y diseños específicos, de acuerdo a las características geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas de cada sitio.

Gradas para establecimiento de vegetación

El talud puede diseñarse con una serie de gradas, las cuales permiten el establecimiento de vegetación. El diseño de estas gradas depende de las características del talud, de la topografía y del sistema de vegetación a utilizar. Se puede requerir la construcción de trinchos para garantizar la estabilidad de las gradas.

Taludes en rellenos (Terraplenes)

Los taludes en llenos deben diseñarse racionalmente teniendo en cuenta las características de los materiales disponibles, el suelo de cimentación y las condiciones de estabilidad y de ejecución en cada sitio.

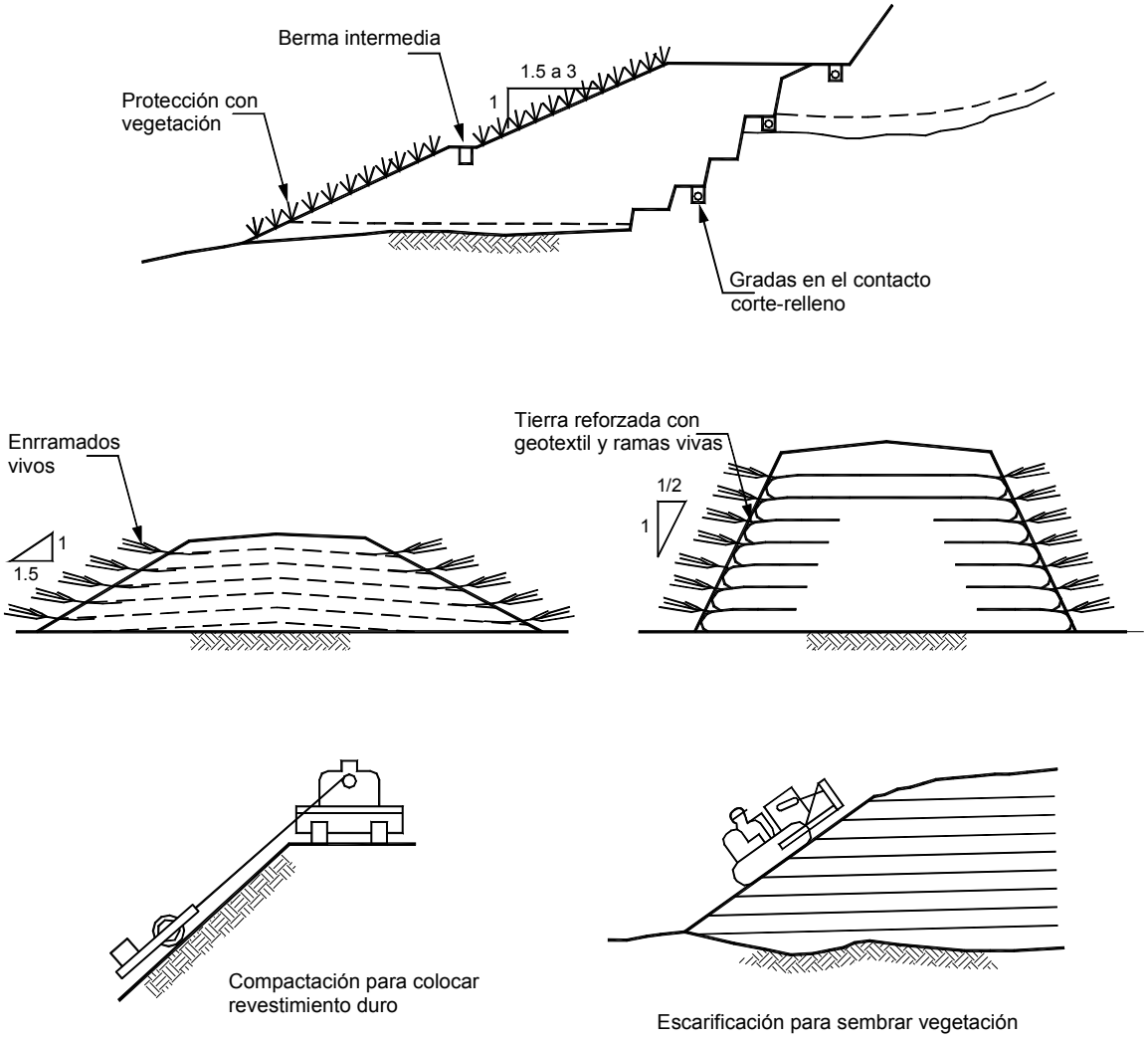


FIGURA 10.5 Diagramas de manejo de rellenos.

TABLA 10.2 Pendientes típicas para taludes en relleno.

Material de relleno	Altura de relleno (mt)	Pendiente
Arena o grava de buena calidad SW, GM, GC, GW, GP	Menos de 5	1.5H:1V a 1.8H:1V
	5 a 15	1.8H:1V a 2H:1V
Arena de mala calidad SP	Menos de 10	1.8H:1V a 2H:1V
Material rocoso	Menos de 10	1.5H:1V a 1.8H:1V
	10 a 20	1.8H:1V a 2H:1V
Suelos areno arcillosos de buena calidad	Menos de 5	1.5H:1V a 1.8H:1V
	5 a 10	1.8H:1V a 2H:1V
Suelos arcillosos blandos	Menos de 5	1.8H:1V a 2H:1V

Generalmente se utilizan pendientes uniformes con bermas cada determinada altura (Figura 10.5). La pendiente a utilizar depende de la pendiente del talud (Tabla 10.2).

También en los rellenos se pueden requerir pendientes combinadas cuando se trabaja con espesores diferentes de materiales diferentes.

Se debe tener especial cuidado en el diseño del sistema de drenaje debajo y detrás del relleno para garantizar la estabilidad y la compactación del suelo subsuperficial de los taludes del terraplén. La superficie de contacto entre el suelo natural y el relleno debe trabajarse en superficies semiplanas o terrazas que permitan una excelente integración entre el relleno y el suelo de fundación. Adicionalmente, se debe construir sistemas de manejo de las aguas de escorrentía y protecciones para las superficies de los taludes.

Debe tenerse especial cuidado en la compactación de la superficie de los taludes, para lo cual se recomienda compactar en forma inclinada, utilizando un sistema de rodillo y/o buldózer. En la mayoría de los casos se requiere proteger el talud con mantos o vegetación (Figura 10.6).

Para el análisis de la estabilidad de los taludes se recomienda consultar el libro "Deslizamiento y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales" (Suárez , 1998).

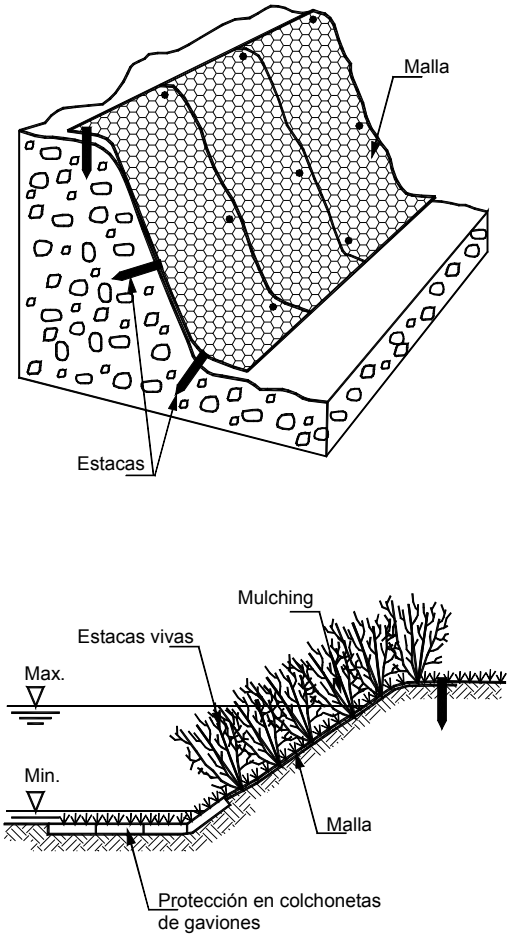


FIGURA 10.6 Protección de la superficie de un talud en corte.

10.2 MANEJO DE LAS AGUAS DE ESCORRENTÍA

Para el diseño de obras de control de escorrentía debe tenerse en cuenta las características de las lluvias, las áreas aferentes, la topografía y las características de la geología, infiltración y erosionabilidad de los suelos. Es importante que las obras de manejo de aguas de escorrentía sean diseñadas con secciones y pendientes suficientes que impidan la concentración de aguas que pudieren inducir la formación de cárcavas de erosión.

Durante la construcción de las obras es frecuente que se dejen las estructuras de control de aguas para las últimas etapas del proyecto y puedan ocurrir lluvias intensas durante la construcción que destruyan las obras ya construidas, debido a que no se manejaron adecuadamente las aguas durante el proceso constructivo.

10.2.1 DRENAJE SUPERFICIAL

El objetivo principal del drenaje superficial es mejorar la estabilidad del talud, reduciendo la infiltración y evitando la erosión.

El sistema de recolección de aguas superficiales debe captar la escorrentía, tanto del talud como de la cuenca de drenaje arriba del talud y llevar el agua a un sitio seguro lejos del talud. El agua de escorrentía debe en lo posible, desviarse antes de que penetre el área cercana a la corona del talud. Esto puede lograrse con la construcción de zanjas interceptoras en la parte alta del talud o canales de desviación.

No se recomienda en problemas de taludes la utilización de conducciones en tubería por la alta susceptibilidad a agrietarse o a taponarse, generando problemas de infiltración masiva concentrada.

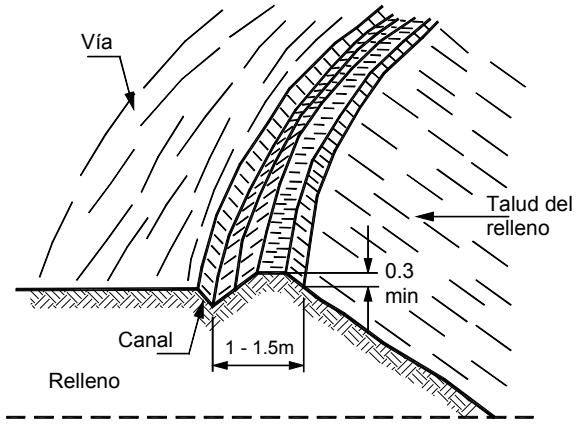


FIGURA 10.7 Canal de protección en la corona del relleno de una vía (AASHTO).

Caudal de escorrentía

La escorrentía recogida depende de varios factores, los cuales incluyen: Intensidad de la lluvia, área de drenaje, pendiente y longitud de los taludes a drenarse, naturaleza y extensión de la vegetación o cultivos, condiciones de la superficie y naturaleza de los suelos subsuperficiales.

Las obras de control de escorrentía "deben diseñarse" para recibir los caudales de una lluvia predeterminada con un período de retorno generalmente de 100 a 500 años, de acuerdo a la importancia de la obra.

Generalmente se recomienda para diseño de obras de drenaje en taludes, la utilización del método racional para calcular las cantidades de agua recogida, debido a que los caudales calculados por la fórmula racional tienen intrínsecamente un factor de seguridad mayor que otros métodos.

$$Q = C\,x\,I\,x\,A$$

Donde:

Q = Caudal recolectado (volumen/tiempo)
I = Intensidad de Lluvia de diseño (mm/hora, la cual depende del tiempo de concentración.
A = Area a drenar.
C = Coeficiente de escorrentía (Tabla 10.3).

Para taludes, la Geotechnical Engineering Office (1984) recomienda utilizar un *C* = 1.0, el cual representa teóricamente una sobreestimación de la escorrentía, pero en la práctica es muy efectiva para tener en cuenta los procesos de sedimentación de los sistemas, especialmente por la presencia de bloques o cantos.

El área de drenaje debe determinarse por medio de un plano con líneas de nivel, definiendo los bordes topográficos de las áreas que aportan agua al sistema de drenaje.

El tiempo de concentración se define como el tiempo máximo tomado por el agua desde el extremo superior del área de drenaje hasta el punto de colección.

El tiempo de concentración puede calcularse utilizando la ecuación modificada de Bransby - Williams:

$$t = 0.14464 \left[\frac{L}{H^{0.2} A^{0.1}}\right]$$

Donde:

t = Tiempo de concentración (min.)
A = Área de drenaje (m^2).
H = Caída promedio (metros por cien metros) desde la parte más alta del área a drenar hasta el punto de diseño.
L = Distancia en metros medida sobre la línea natural de flujo entre el punto de diseño y el punto de drenaje que toma el tiempo más largo en llegar a la sección de diseño.

TABLA 10.3 Valores típicos del coeficiente de escorrentía C (Japan Road Association).

Superficie	Características	Coeficiente C
Superficie de carretera	Pavimentada	0.7 a 0.95
	Destapada	0.3 a 0.7
Talud	Suelo fino	0.4 a 0.65
	Suelo Grueso	0.1 a 0.3
	Roca dura	0.7 a 0.85
	Roca blanda	0.5 a 0.75
Pastizales en suelos arenosos	Pendiente 0 a 2%	0.05 a 0.1
	2 a 7%	0.1 a 0.15
	Más de 7%	0.15 a 0.25
Pastizales en suelos arcillosos	Pendiente 0 a 2%	0.13 a 0.17
	2 a 7%	0.18 a 0.22
	Más de 7%	0.25 a 0.35
Escarpes de fuerte pendiente en Roca		0.75 a 0.95
Arenas intermedias		0.20 a 0.40
Parques con árboles y pastos		0.10 a 0.25
Montañas de pendientes suaves		0.30
Montañas de pendientes fuertes		0.50

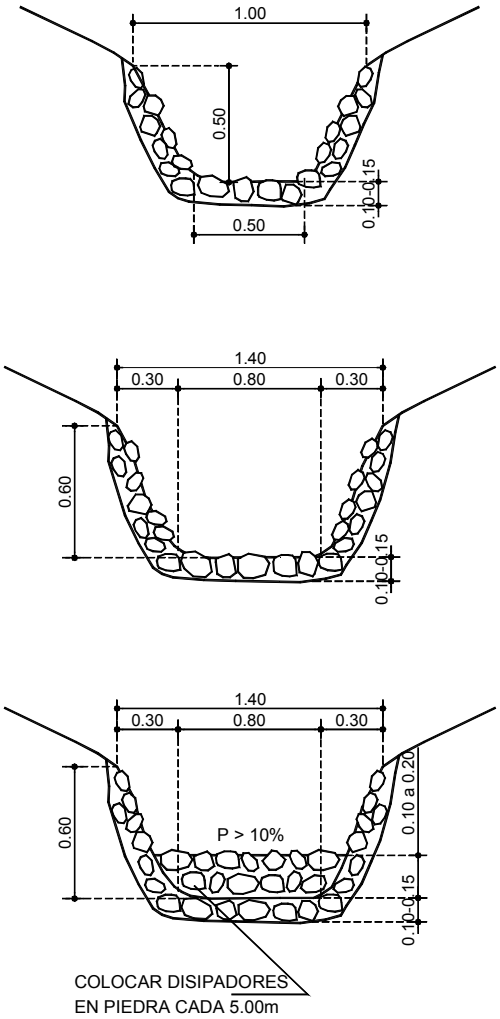


FIGURA 10.8 Canales en piedra pegada con mortero.

Especial atención debe darse a las corrientes que han sido canalizadas o modificadas y por lo tanto se ha disminuido el tiempo de concentración.

Como la intensidad media de la lluvia disminuye con la duración, la mayor colección de flujo ocurre cuando la duración de la tormenta es igual al tiempo de concentración.

Para el diseño de obras en taludes, se recomienda diseñar con base en un periodo de retorno de 200 años, de acuerdo a las recomendaciones del Geotechnical Engineering office, de Hong Kong.

Es muy importante para el correcto diseño de las obras de drenaje superficial, que se realice un estudio muy completo de la información hidrológica existente para determinar lo más exactamente posible el aguacero máximo esperado. La mayoría de los diseños de obras de drenaje superficial en taludes, que se realizan con procedimientos totalmente empíricos, dan como resultado obras insuficientes con secciones que no son capaces de manejar los caudales de agua que se concentran en las coronas de los taludes. Es muy común que las obras de control de aguas aceleren los procesos de erosión por falta de capacidad para manejar los caudales.

10.2.2 TIPOS DE CANAL

Los canales son estructuras que interceptan la escorrentía y la conducen lateralmente (Figura 10.7). Los canales interceptores se emplean como zanjas en la corona de taludes y cárcavas de erosión o en sitios intermedios. Adicionalmente se pueden utilizar

bermas o bancas para disminuir la longitud del canal erosionado y dividir la escorrentía en volúmenes fácilmente manejables. Estos canales o bermas deben ser recubiertos para protección contra la erosión o posibles deslizamientos.

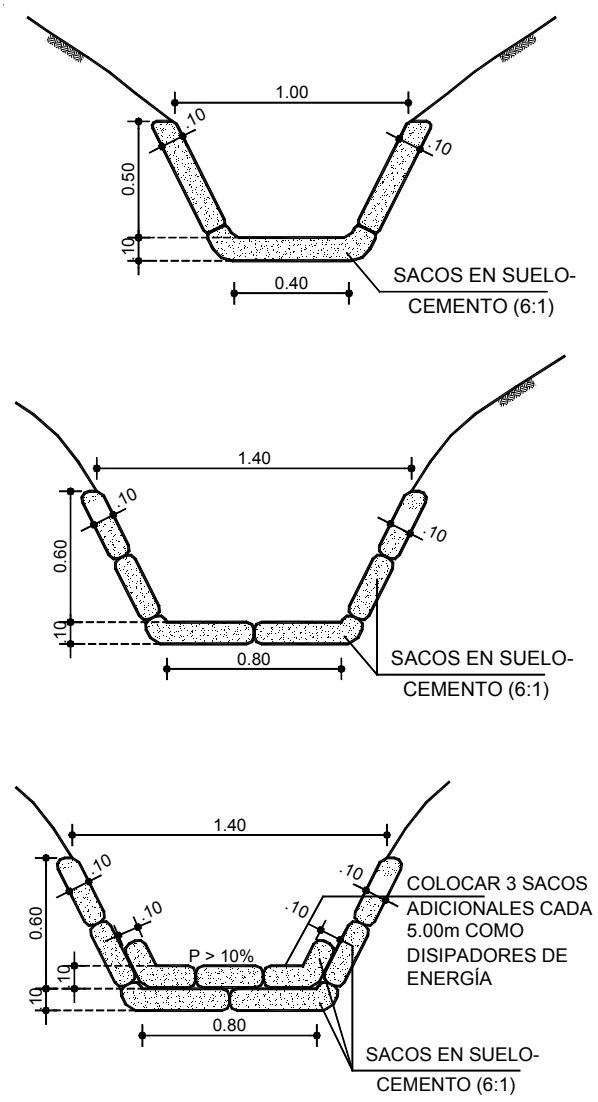


FIGURA 10.9 Canales revestidos en suelo cemento.

Canales desviadores del flujo arriba del talud

Son canales que se construyen arriba del corte de la vía o estructura, con el objeto de desviar completamente la escorrentía y alejarla lo más posible de la estructura o talud.

Estos canales ayudan a disminuir el riesgo de surcos y cárcavas sobre la superficie del talud.

El canal desviador no debe construirse muy cerca al borde superior del talud, para evitar que se conviertan en el comienzo y guía de un deslizamiento en cortes recientes o de una nueva superficie de falla (movimiento regresivo) en deslizamientos ya producidos; o se produzca la falla de la corona del talud o escarpe.

Se recomienda que los canales desviadores sean totalmente impermeabilizados, así como debe proveerse una suficiente pendiente para garantizar un rápido drenaje del agua captada. La recomendación de impermeabilizar se debe adicionar con un correcto mantenimiento.

Las dimensiones y ubicación de la zanja pueden variar de acuerdo a la topografía de la zona y al cálculo previo de caudales colectados. Generalmente, se recomienda una zanja rectangular de mínimo 60 centímetros, de ancho y 50 centímetros de profundidad.

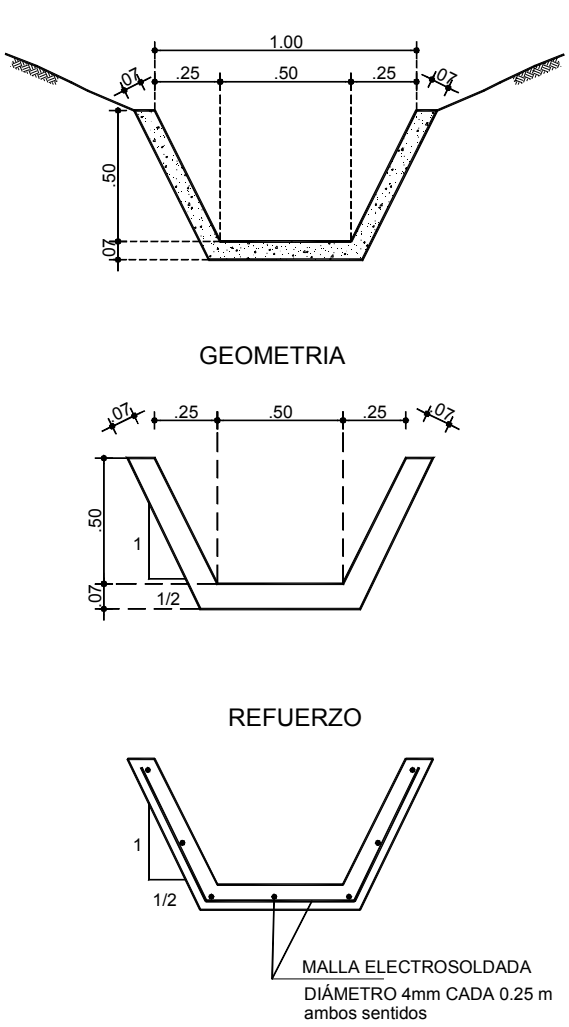


FIGURA 10.10 Canales revestido en concreto

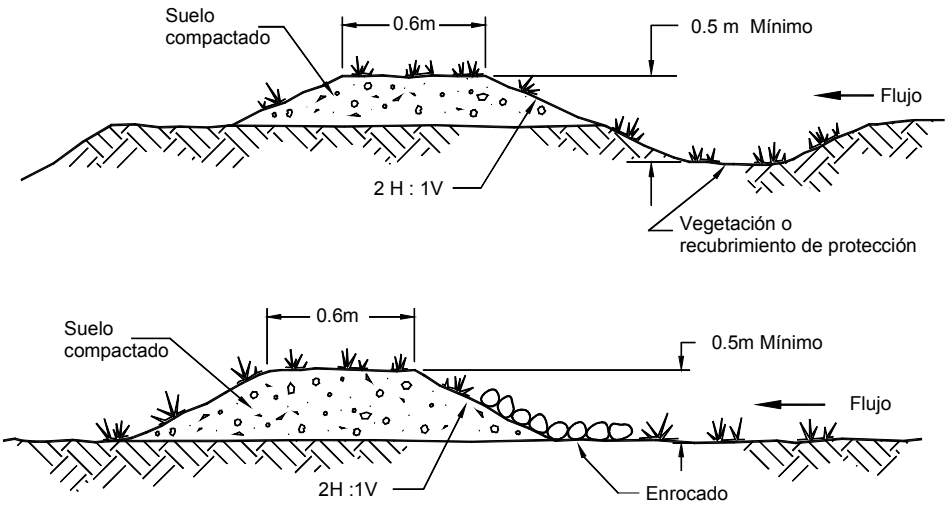


FIGURA 10.11 Dique para el desvío de aguas de escorrentía (McCullah, 2001).

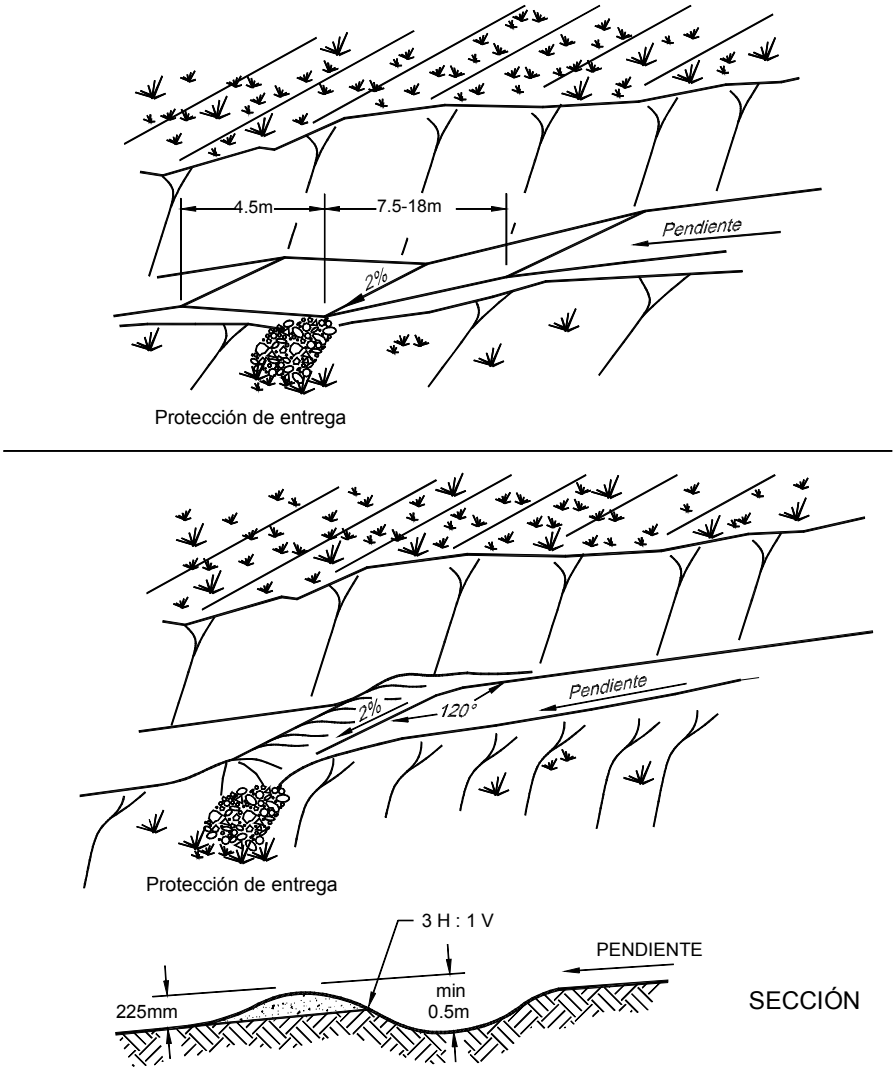


FIGURA 10.12 Diagrama ilustrativo de la función de un cortacorriente.

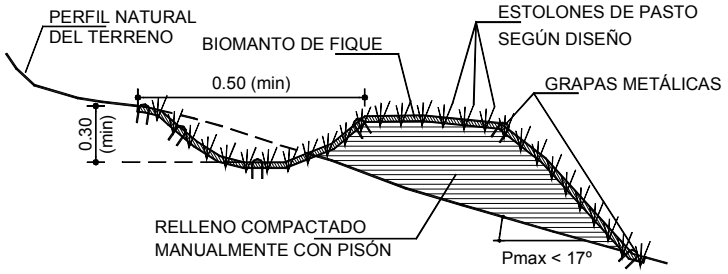
Diques en la corona del talud

Estas obras consisten en montículos de tierra o pantallas que se colocan en la parte superior del talud (Figura 10.11), con el objeto impedir el paso de la escorrentía hacia la superficie del talud. Este es un método muy utilizado en rellenos de carreteras. Se recomienda que vaya acompañado de un canal superior.

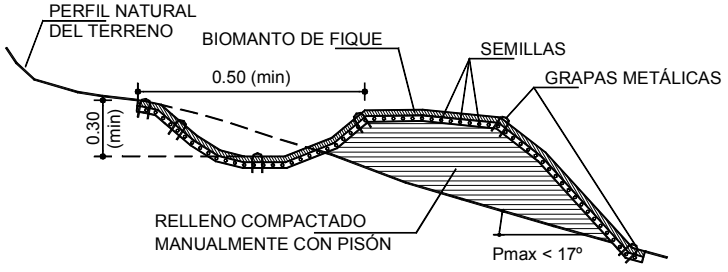
Los cortacorrientes o canales interceptores

Los cortacorrientes son canales transversales al talud, espaciados a intervalos para recolectar el agua de escorrentía y evitar la formación de corrientes a lo largo de la pendiente principal (Figura 10.12). La construcción de canaletas al través de un talud intercepta el agua e impide que su velocidad aumente y la lleve a un lugar seguro. Estos cortacorrientes deben estar protegidos contra la erosión utilizando revestimientos en sacos de suelo cemento o vegetación. Las aguas recolectadas por los cortacorrientes son llevadas a unos canales colectores localizados generalmente a un lado del talud. Los canales a mitad de talud deben tener una pendiente tal que impida la sedimentación de materiales. Es muy común que estos canales se construyan con pendientes muy bajas y al taponarse produzcan cárcavas de erosión localizadas.

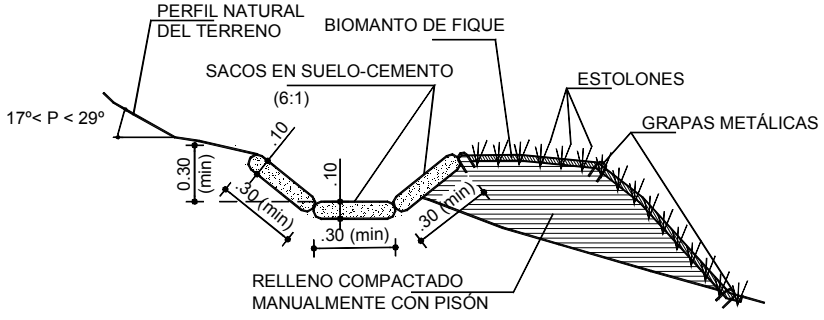
Se recomienda construir canales interceptores en todas y cada una de las bermas intermedias del talud. Estos canales deben revestirse apropiadamente conduciendo las aguas a canales o graderías de



1. REVEGETALIZACIÓN CON BIOMANTO Y ESTOLONES



2. REVEGETALIZACIÓN CON BIOMANTO Y SEMILLA



3. RECUBIERTOS CON BOLSAS DE SUELO - CEMENTO

FIGURA 10.13 Cortacorrientes en corte relleno.

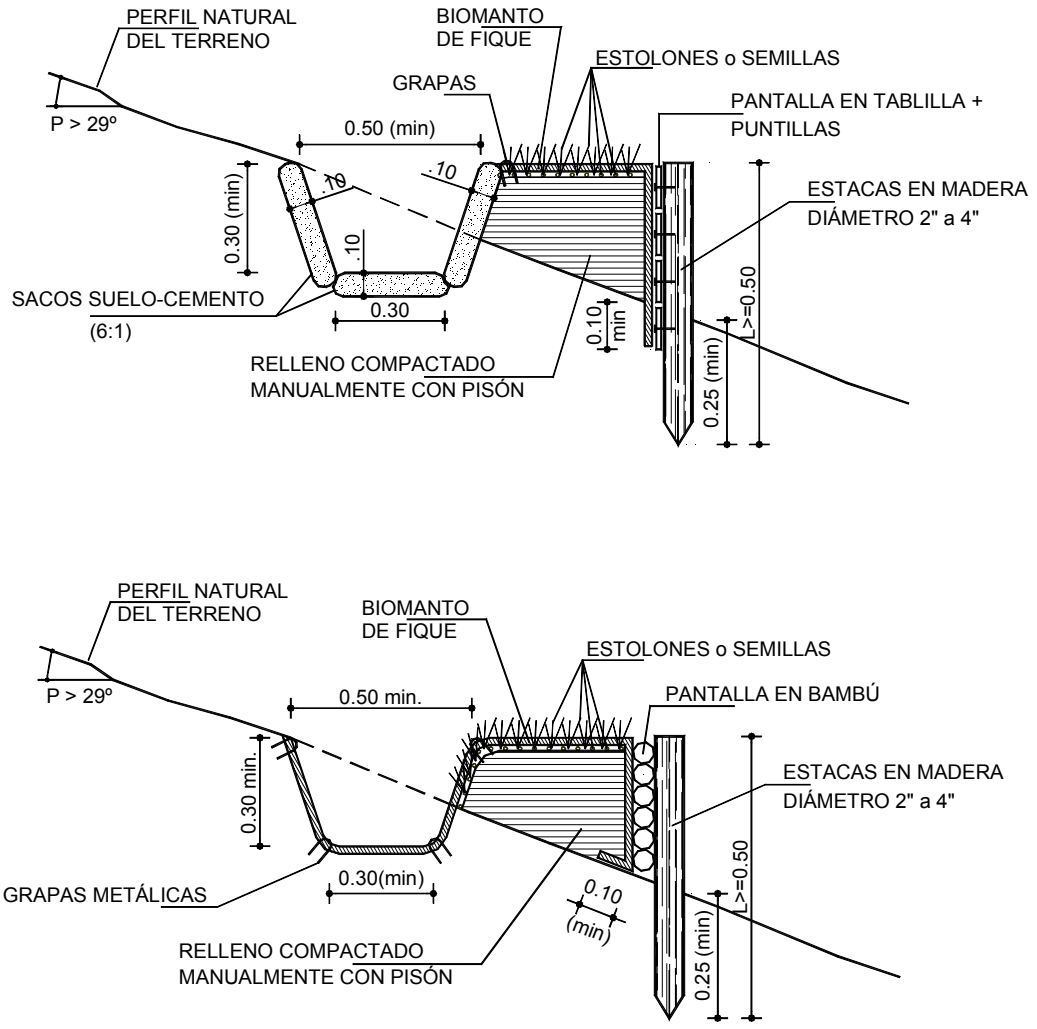


FIGURA 10.14 Cortacorrientes utilizando trinchos.

disipación de energía. Las bermas deben ser lo suficientemente anchas para que exista un sobreancho de protección para los canales, en el caso de producirse deslizamientos de las coronas de los taludes resultantes.

Generalmente los canales en taludes se construyen en tamaños y configuración estándar. El ingeniero debe comprobar que este tamaño estándar es suficiente para cada caso en particular y si es necesario diseñar canales de mayor capacidad.

Recomendaciones para canales interceptores en taludes de carreteras (AASHTO, 1999)

La AASHTO recomienda tener en cuenta los siguientes criterios para el diseño y construcción de canales interceptores en taludes de carreteras:

- La sección del canal debe tener una capacidad mínima para conducir la escorrentía esperada de un aguacero con un periodo de retorno de diez años, con un borde libre de al menos 100 mm.
- En zonas de alto riesgo como taludes junto a escuelas, hospitales, etc., se recomienda trabajar con un periodo mínimo de retorno de 100 años.
- El canal puede tener forma parabólica, trapezoidal o en V .
- Los taludes laterales no deben tener pendientes mayores de 2 H : 1 V.
- El ancho mínimo es de 1.2 metros.
- Todo canal debe ser recubierto o revegetalizado.
- Deben eliminarse todas las irregularidades para garantizar un canal uniforme. Si se requieren rellenos estos deben ser compactados adecuadamente.

10.2.3 DISEÑO DE CANALES

En el diseño de canales se debe tener en cuenta los siguientes elementos:

a. Localización. Los canales deben localizarse en tal forma que intercepten la mayor cantidad de flujo y a suficiente distancia de los sitios críticos para evitar amenazas de movimientos del canal.

b. Alineamiento. Los canales deben construirse para permitir un paso suave del flujo. Deben evitarse los cambios fuertes de dirección o de gradiente.

c. Tamaño. El tamaño de los canales debe ser suficiente para conducir el caudal de agua de diseño, con un factor de seguridad adicional.

d. Revestimiento. Los canales deben revestirse con un material que pueda resistir las velocidades del agua.

Si el volumen de escorrentía es significativo, las cunetas deben diseñarse empleando los principios de la hidráulica y si el caudal es pequeño, generalmente se adoptan diseños estándar. Las cunetas pueden construirse en concreto simple o armado, o con elementos prefabricados debidamente sellados en el campo. Una práctica común es el uso de concreto lanzado, colocando previamente juntas premoldeadas. Recientemente se ha incrementado el uso de cunetas de medios tubos de concreto, gres, PVC o metal.

Diseño hidráulico

El diseño hidráulico de la cuneta debe proveer velocidades lo suficientemente altas para que no sedimenten (Pendientes de más del 4%) y limitando su velocidad a diez metros por segundo para que no produzcan abrasión de los materiales de la cuneta y deben diseñarse estructuras de disipación para evitar velocidades excesivas. Los cambios de dirección de la cuneta y estructuras de disipación conducen a que se incremente el área de la sección del flujo y éste detalle debe tenerse muy en cuenta en el diseño.

El gradiente mínimo de los canales es determinado por la velocidad de flujo necesaria para evitar la sedimentación. La velocidad no debe ser menor de 1.3 m/segundo para el flujo de periodo de retorno de 2 años.

El dimensionamiento del canal puede hacerse utilizando la fórmula de Manning, asumiendo una velocidad máxima permisible de 4 m/seg. y una rugosidad de 0.013. La pendiente mínima permitida es del 4% para impedir la sedimentación.

Para calcular la velocidad de flujo se puede utilizar la siguiente expresión:

$$V = \frac{1}{\eta}\left[R^{0.67} S^{0.5}\right]$$

Donde

V = Velocidad en m/seg.

η = Factor de rugosidad

R = Profundidad hidráulica media = $\frac{A}{p}$ en metros

S = Pendiente promedio del canal

La separación entre cunetas intermedias debe depender de la intensidad de la lluvia y la pendiente del terreno, así como de la erosionabilidad del suelo. Sin embargo, algunos códigos o manuales sugieren espaciamientos tipo. Por ejemplo, el Uniform Building Code (1991) especifica espaciamientos de diez metros y la Geotechnical Control Office (1984) de Hong Kong recomienda espaciamientos entre 5 y 8 metros.

Confluencia de canales

Las uniones de canales representan el problema más delicado en un sistema de drenaje. Ellos inevitablemente causan turbulencia, adicionado por la vulnerabilidad a ser bloqueado por cantos de material. Se recomienda en las uniones ampliar la sección de los canales para darles una mayor capacidad y contener la turbulencia.

Debe hacerse un diseño detallado de la confluencia de un canal a otro. En estos sitios se puede presentar el caso de flujo subcrítico o supercrítico.

En el caso de flujos subcríticos se calculan los perfiles de la superficie de agua en la unión, iniciando en un punto aguas abajo de la confluencia; balanceando la energía de cada uno de los flujos que llegan con la energía en la confluencia, se calcula la altura de flujo. En uniones con flujo supercrítico se puede presentar resalto hidráulico, generación de ondas y escape de la corriente por encima del canal. Se recomienda levantar en forma importante la altura de los canales en la vecindad de la unión y en una longitud considerable aguas abajo de la unión. Desafortunadamente no existen metodologías confiables para calcular la unión en flujos supercríticos. En el caso de curvas se requieren sobreelevaciones en el borde convexo del canal.

FOTOGRAFÍA 10.1 Conformación del talud previamente al establecimiento de la vegetación.

FOTOGRAFÍA 10.2 Talud conformado y vegetalizado.

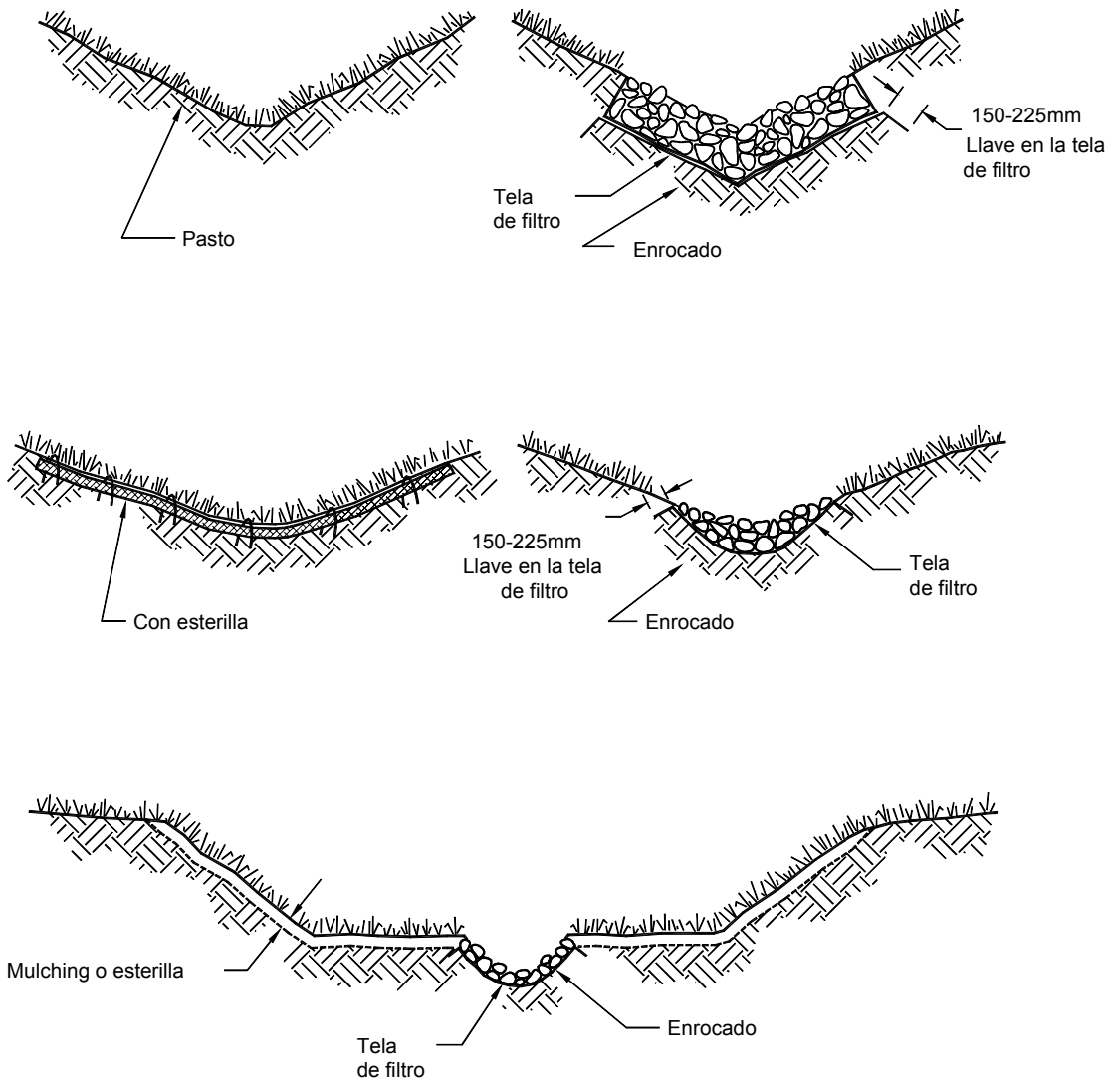


FIGURA 10.15 Vegetalización de canales (McCullah, 2001).

Cualquier cambio de dirección cambia el sistema de flujo, por lo tanto las curvas en los cambios de dirección para una velocidad de aproximadamente 2 m/seg., deben tener un radio no menor de tres veces el ancho del canal. Este radio debe incrementarse cuando la velocidad es mayor de 2 m/seg.

Revestimiento de canales en taludes

Las cunetas pueden revestirse utilizando los siguientes sistemas:

1. Concreto y mortero o suelo-cemento.
2. Asfalto
3. Fibra de vidrio con asfalto como ligante. Se extienden las fibras en una proporción de 100 a 200 g/m^2 y luego se cubren con asfalto 1.1 a 1.6 litros/m^2 (AASHTO 1999).
4. Vegetación (Utilizando un biomanto de protección). Los biomantos deben anclarse enterrándolos mínimo cada 15 metros de intervalo.
5. Enrocado pegado con mortero
6. Enrocado suelto (El tamaño de las piedras debe diseñarse de acuerdo a la velocidad del agua).

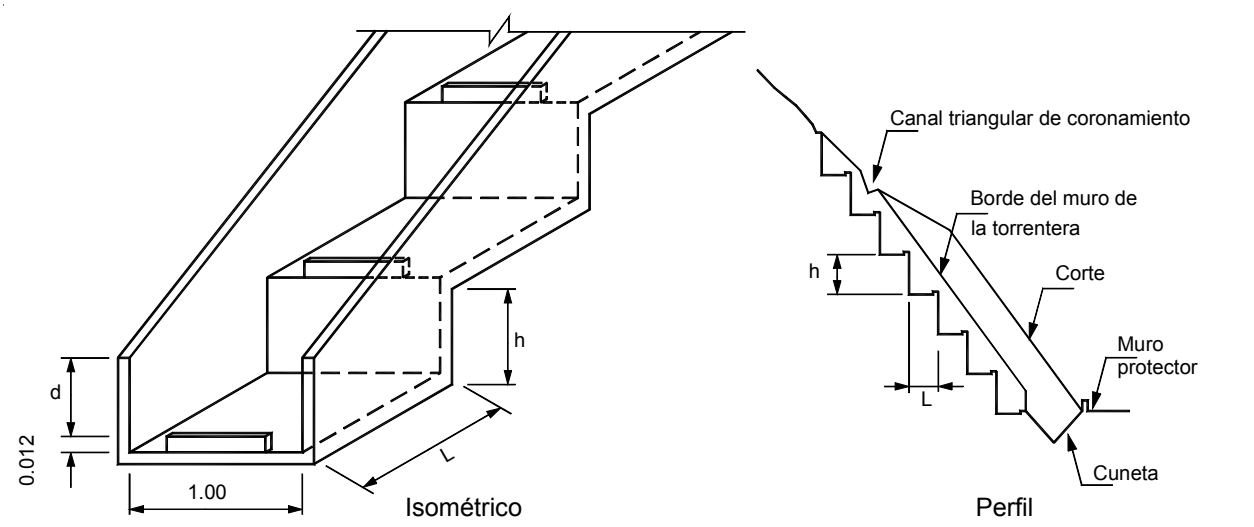


FIGURA 10.16 Torrentera en gradería.

10.2.4 CANALES COLECTORES Y DISIPADORES

El agua recogida por los canales e interceptores es entregada a canales de alta velocidad generalmente en la dirección del talud. Las alturas verdaderas de flujo son mayores que las calculadas por la ecuación de Manning por la presencia de aire atrapado.

Se presentan dos tipos diferentes de canales: El canal rápido y el canal en gradería.

El canal rápido se construye a una pendiente igual a la del talud y en ocasiones se le colocan elementos sobresalientes en su fondo para disipar energía. Este sistema es muy utilizado por ser más económico, pero presenta el problema de la poca energía disipada. A lo largo de las canaletas se recomienda colocar elementos que produzcan gran rugosidad para generar flujo amortiguado y minimizar la velocidad en su pie.

En modelos hidráulicos muy sencillos en el laboratorio se puede obtener el valor de rugosidad que se debe emplear de acuerdo a las características de la rugosidad. Generalmente se emplean gradas, bloques salientes de concreto o piedras enterradas en el concreto.

El sistema de graderías es más eficiente para disipar energía. El flujo en este tipo de canal es turbulento y debe construirse un muro lateral de borde libre suficiente para permitir la salpicadura del flujo. En la ausencia de datos experimentales, los canales en gradería pueden diseñarse asumiendo una velocidad de 5.0 m/seg., a través de la sección mínima en la cabeza de cada grada.

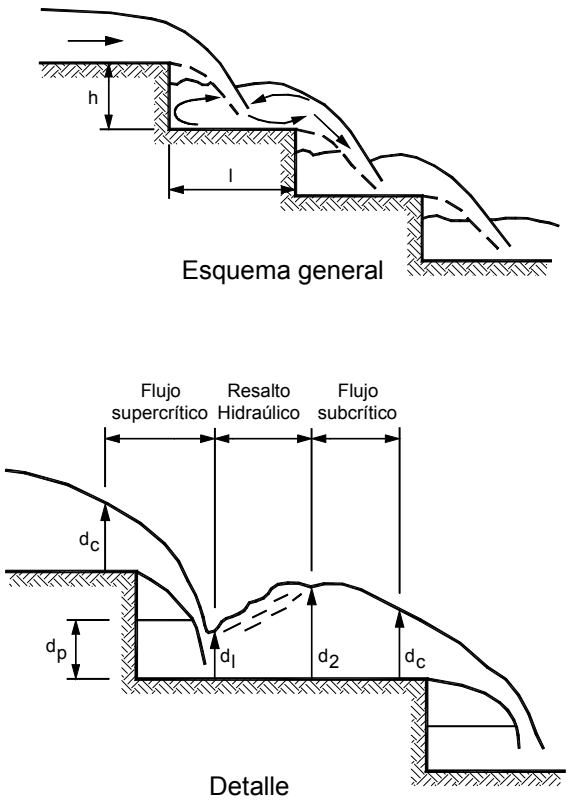


FIGURA 10.17 Régimen de flujo saltante sobre un canal en gradería (Mejía, 1999).

Estructuras en gradería

Son estructuras rápidas escalonadas las cuales están formadas por una serie de gradas o escalones dentro del canal (Figura 10.16). Este canal en gradas conduce el agua y al mismo tiempo se va disipando energía en cada uno de los escalones.

El régimen de flujo de las rápidas escalonadas depende de las características geométricas y el caudal manejado por la estructura. Pueden analizarse dos situaciones:

a. Régimen de flujo saltante

En este caso la disipación de energía se genera independientemente en cada escalón al romperse el chorro en el aire, al mezclarse en el escalón o por formación de resaltos hidráulicos (Figura 10.17) (Mejía, 1999).

b. Régimen de flujo rasante (Skimming)

Las gradas actúan como una rugosidad del canal donde se desarrollan vórtices y la disipación se obtiene en la formación de estas turbulencias en las gradas. Para el diseño de rápidas escalonadas Mejía (1999) recomienda seguir los siguientes pasos:

- Estimar el caudal de diseño
- Evaluar la geometría del canal (pendiente, altura y ancho)
- Seleccionar la altura óptima de los escalones para obtener el sistema de flujo deseado.
- Calcular las características hidráulicas del flujo.
- Diseño de la cresta.
- Calcular la altura de las paredes del canal considerando un borde libre de salpicaduras.

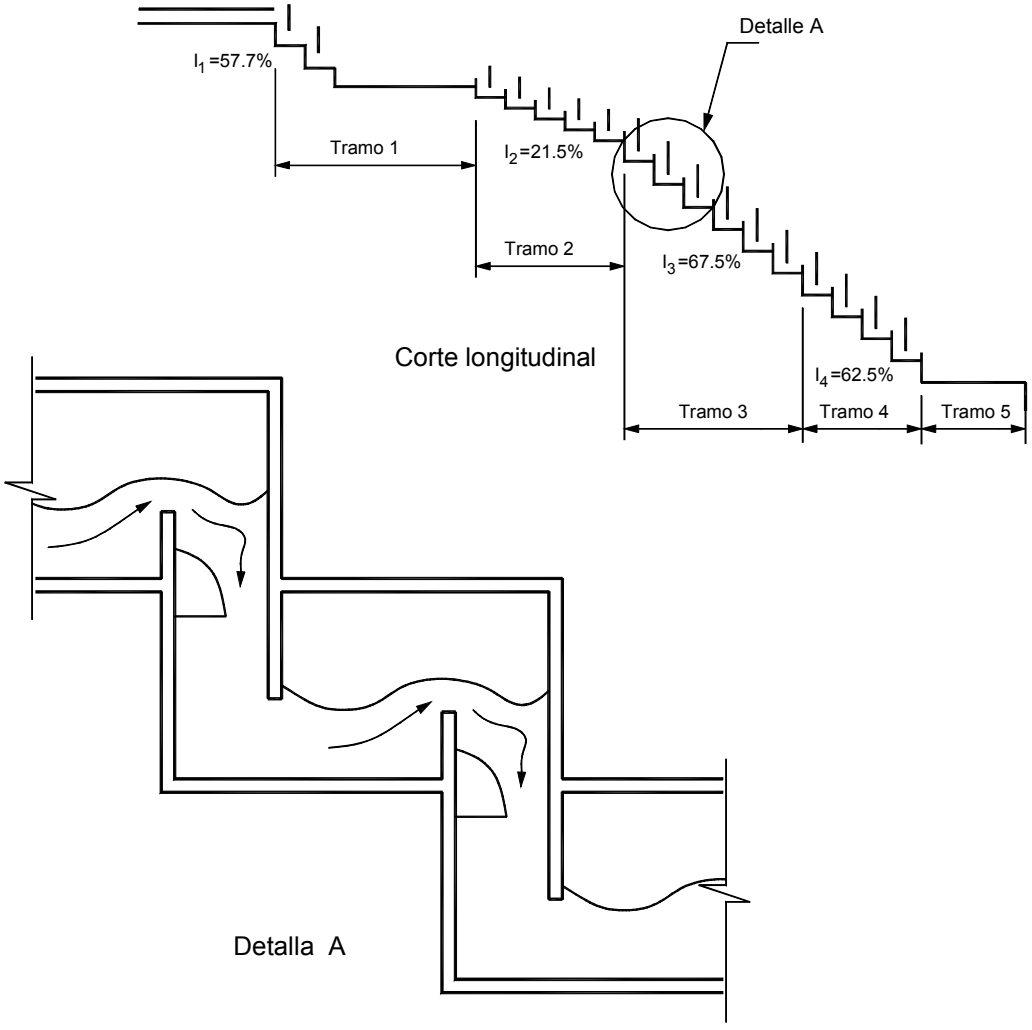


FIGURA 10.18 Sistema de vertimiento con vertedero y pantalla utilizada en Bucaramanga-Colombia.

De acuerdo a las necesidades de disipación y a las condiciones del flujo se pueden plantear elementos adicionales de disipación en las rápidas, así:

a. Bloques de concreto o salientes en la grada

Son elementos que bloquean el flujo y ayudan en el proceso de disipación.

b. Rápidas escalonadas con tapa

El sistema consiste en una rápida con una serie de tapas que interceptan los chorros de agua y facilitan la disipación.

c. Rápidas escalonadas con vertedero y pantalla

Se forza un resalto hidráulico en el escalón utilizando un levantamiento o contravertedero y se coloca una pantalla para recibir el golpe del flujo (Figura 10.18).

Canal con pantallas deflectoras

Consiste en un canal de sección rectangular y fondo liso dentro del cual se coloca una serie de obstáculos o pantallas deflectoras en ambas paredes del canal (Figura 10.19).

Para caudales pequeños el flujo es desviado lateralmente en forma consecutiva y en caudales altos los obstáculos actúan como grandes rugosidades que disipan energía en el fondo del canal.

Rápidas lisas con estructuras de disipación

Son canales de fondo liso que conducen el agua al pie del talud o a una cañada. En estos canales el agua adquiere grandes velocidades y se requiere la

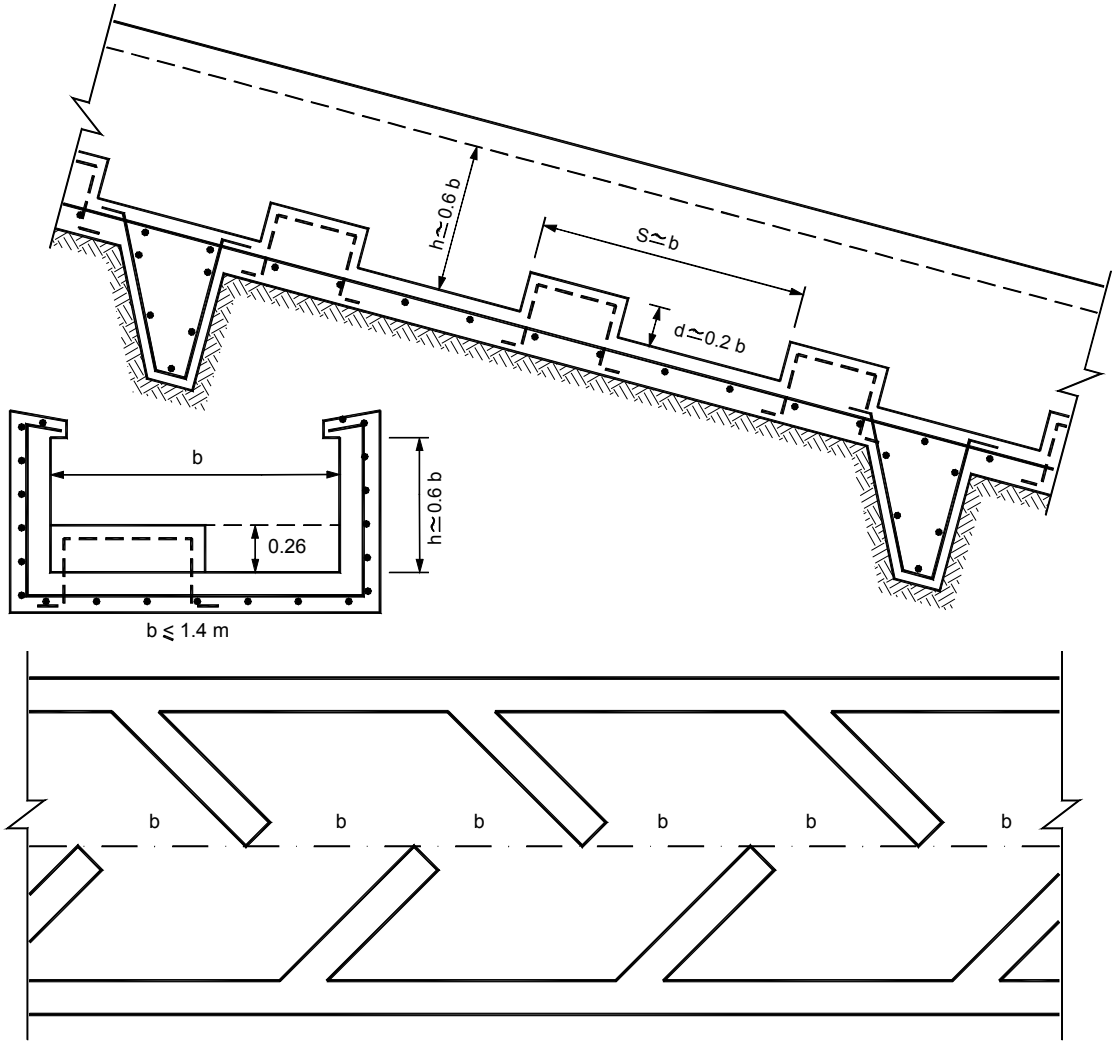


FIGURA 10.19 Canal disipador con pantallas deflectoras.

construcción de una estructura de disipación o tanque de amortiguación en el pie del talud. Las estructuras de disipación también se pueden construir en sitios a lo largo del canal, de acuerdo a las condiciones topográficas e hidráulicas del canal.

Disipador de caída libre

Consiste en un vertedero y contravertedero en los cuales se trata de producir un resalto hidráulico.

Existe además una gran cantidad de sistemas de disipación de energía en pozos de aquietamiento, algunos de los cuales se explican en el capítulo 13.

Protección de la entrega de canales en carreteras

La AASHTO(1999) recomienda que todas las entregas de canales en suelos susceptibles a la erosión sean protegidas de acuerdo a los siguientes criterios:

- En toda entrega deben construirse estructuras de transición para absorber el impacto inicial del flujo y reducir la velocidad a un nivel que no erosione las áreas receptoras del flujo (Figuras 10.20 y 10.21).

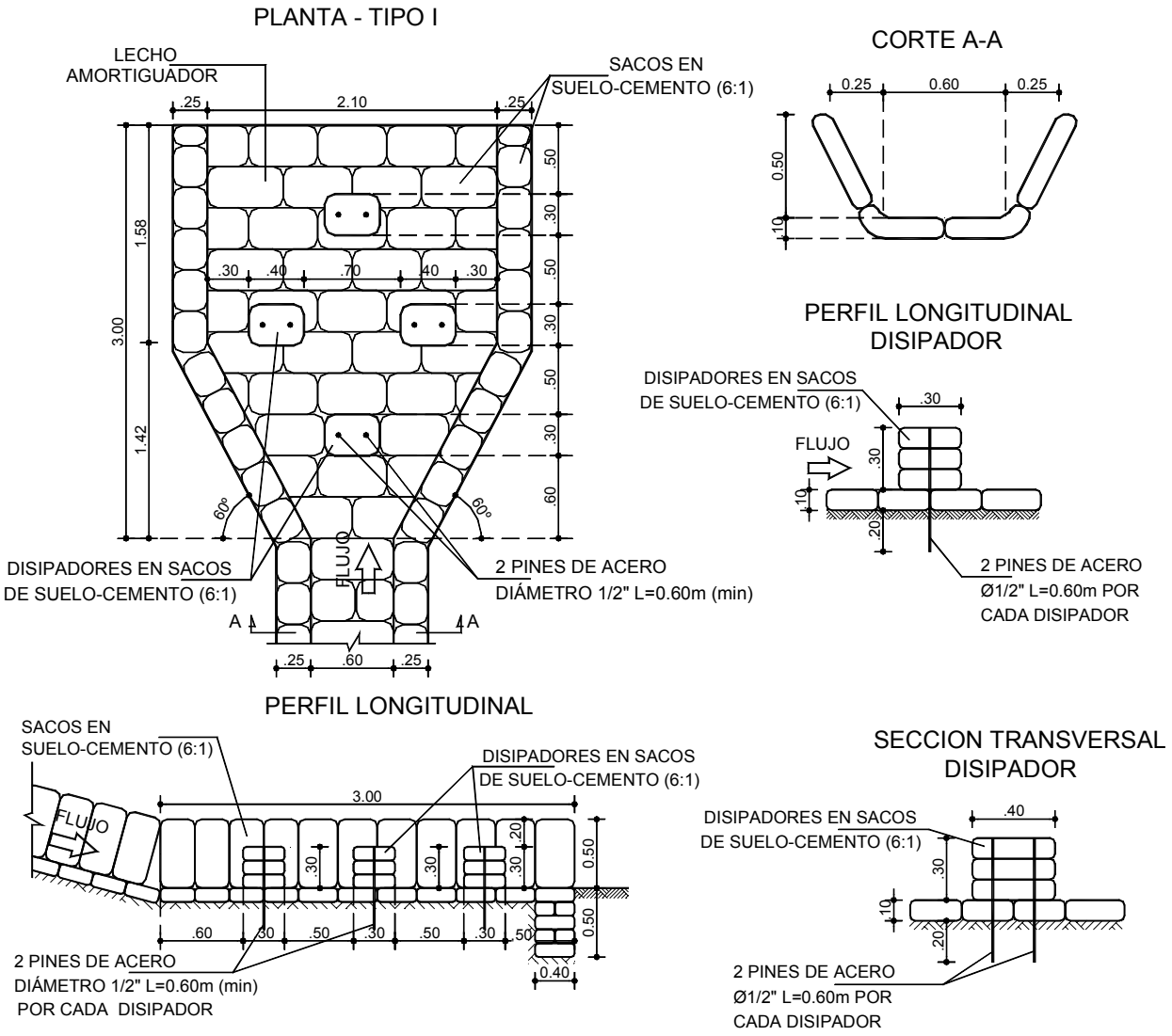

PLANTA - TIPO I
LECHO AMORTIGUADOR
SACOS EN SUELO-CEMENTO (6:1)
DISIPADORES EN SACOS DE SUELO-CEMENTO (6:1)
2 PINES DE ACERO DIÁMETRO 1/2" L=0.60m (min)
FLUJO
60°
A
CORTE A-A
PERFIL LONGITUDINAL DISIPADOR
DISIPADORES EN SACOS DE SUELO-CEMENTO (6:1)
FLUJO
2 PINES DE ACERO Ø1/2" L=0.60m POR CADA DISIPADOR
PERFIL LONGITUDINAL
SACOS EN SUELO-CEMENTO (6:1)
DISIPADORES EN SACOS DE SUELO-CEMENTO (6:1)
FLUJO
2 PINES DE ACERO DIÁMETRO 1/2" L=0.60m (min) POR CADA DISIPADOR
SECCION TRANSVERSAL DISIPADOR
DISIPADORES EN SACOS DE SUELO-CEMENTO (6:1)
2 PINES DE ACERO Ø1/2" L=0.60m POR CADA DISIPADOR

FIGURA 10.20 Protección y disipación de energía en entrega de canal en sacos de suelo cemento.

TABLA 10.4 Velocidades permisibles para áreas cubiertas con vegetación.

Pendiente	Vegetación	Velocidad permitida (m/seg)
0 a 5%	Pastos de raíz profunda	1.8
	Pastos de raíz poco profunda	1.2
5 a 10%	Pastos de raíz profunda	1.5
	Pastos de raíz poco profunda	0.9
Más del 10%	Pastos de raíz profunda	1.2
	Pastos de raíz poco profunda	0.9
En suelos erosionables estas velocidades deben disminuirse en un 25% (AASHTO, 1999).		

- Para velocidades bajas se recomienda construir un colchón protector recubierto en piedra o concreto. Estos colchones se construyen a una pendiente cero y con una longitud relacionada con el caudal y el nivel de agua.
- En todos los casos se debe limitar la velocidad, de acuerdo al tipo de suelo y protección (Tablas 10.4 y 10.5).

TABLA 10.5 Velocidades permisibles para suelos desnudos (AASHTO, 1999).

Tipo de suelo	Velocidad permisible (m/seg.)
Arena fina	0.8
Arena gruesa	0.9
Arena arcillosa	1.0
Grava fina	1.5
Arcilla dura	1.5
Grava gruesa	1.8
Lutitas y suelos cementados	1.8

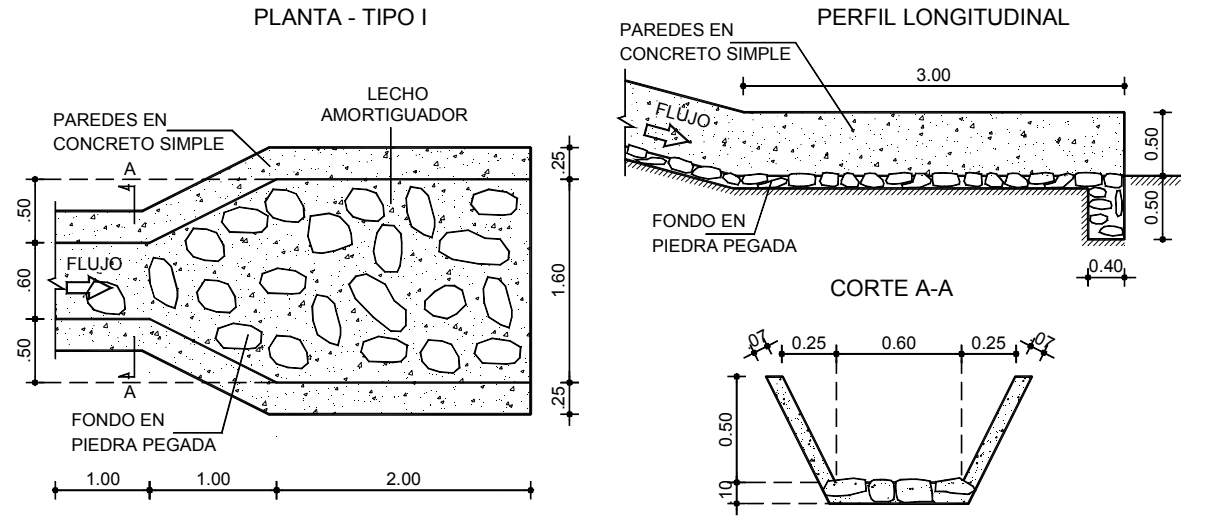


FIGURA 10.21 Protección de entrega de un canal en piedra pegada con mortero.

10.3 PROTECCIÓN DE LA SUPERFICIE DEL TALUD

Para la protección de la superficie del talud se emplea generalmente la vegetación pero en algunos casos se requiere la construcción de otro tipo de recubrimientos, especialmente cuando no es posible garantizar el establecimiento y mantenimiento de la cobertura vegetal. En el capítulo 11 se muestran los diferentes tipos de recubrimiento utilizados, y en el capítulo 9 los sistemas de protección utilizando vegetación.

Problemas para el establecimiento de vegetación

El establecimiento eficiente de vegetación requiere de una serie de condiciones ambientales que permitan su germinación y crecimiento.

Los principales problemas que dificultan la formación de una buena cobertura vegetal son los siguientes:

1. Acidez del suelo

Los suelos ácidos con pH menor de 5 dificultan el establecimiento de plantas. En estos casos se requiere implementar tratamientos químicos para mejorar la acidez, especialmente utilizando productos calcáreos.

2. Falta de humedad

En los climas áridos y semiáridos la humedad del suelo no es suficiente para que la vegetación pueda permanecer por largos períodos de tiempo y se requiere de riego permanente.

3. Pendientes excesivas en grandes alturas

Los taludes de muy alta pendiente y de gran altura no permiten el mantenimiento de la humedad y dificultan el establecimiento de la cobertura vegetal. Adicionalmente la pendiente alta produce inestabilidad del suelo subsuperficial y la vegetación fácilmente se desprende de la superficie inclinada.

4. Falta de nutrientes

En estos casos se requiere la colocación de nutrientes que faciliten un buen establecimiento de las plantas, estos nutrientes requieren de un reabastecimiento o mantenimiento a lo largo del tiempo.

5. Presencia de sal

En los taludes cerca al mar las plantas pueden morir por la presencia de sal.

En los casos en los cuales es muy difícil o no es posible el establecimiento de vegetación, se debe acudir a otro tipo de protección de la superficie.

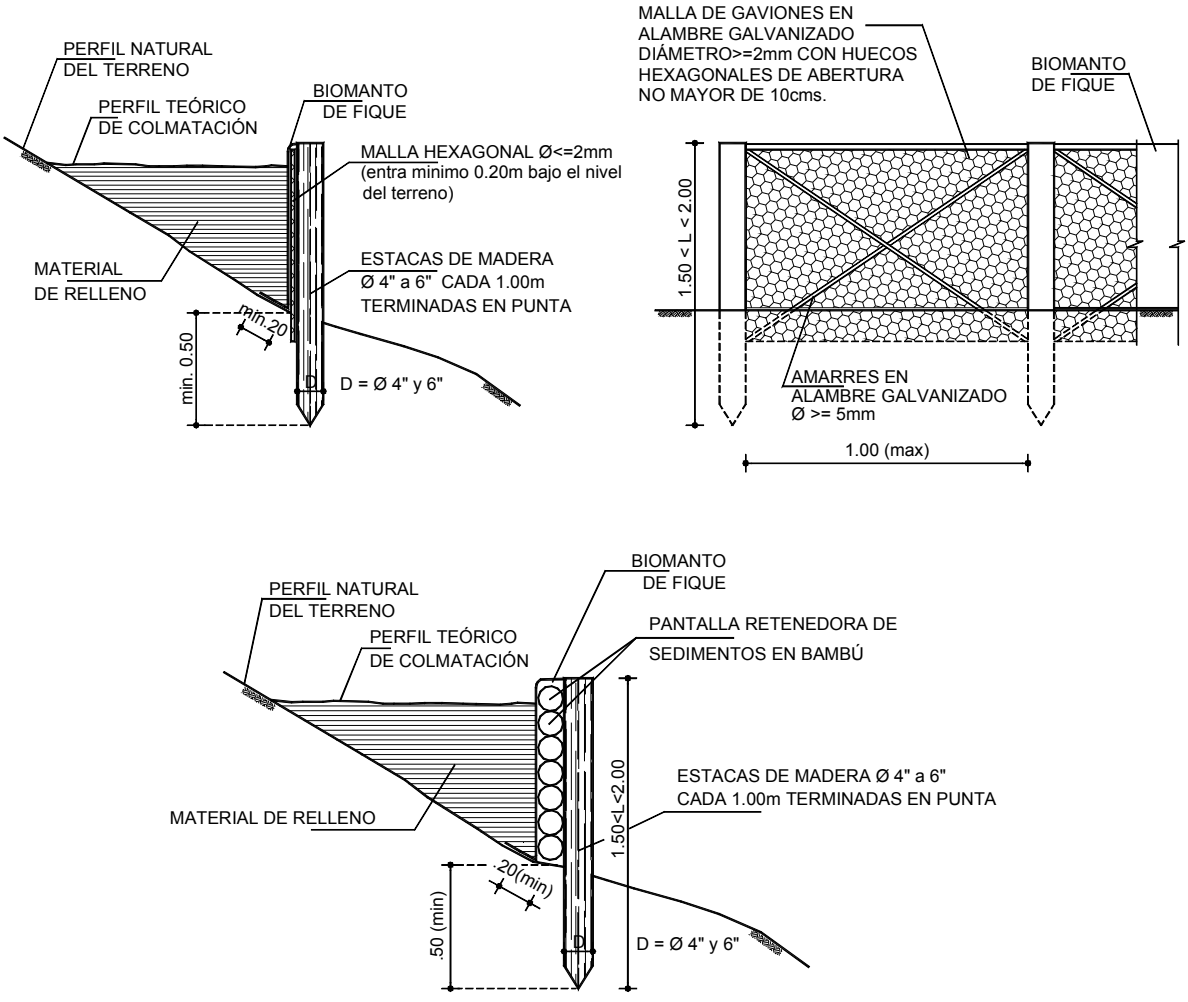

PERFIL NATURAL DEL TERRENO
PERFIL TEÓRICO DE COLMATACIÓN
BIOMANTO DE FIQUE
MALLA HEXAGONAL Ø<=2mm (entra mínimo 0.20m bajo el nivel del terreno)
MATERIAL DE RELLENO
ESTACAS DE MADERA Ø 4" a 6" CADA 1.00m TERMINADAS EN PUNTA
min. 20
min. 0.50
D
D = Ø 4" y 6"
MALLA DE GAVIONES EN ALAMBRE GALVANIZADO DIÁMETRO>=2mm CON HUECOS HEXAGONALES DE ABERTURA NO MAYOR DE 10cms.
BIOMANTO DE FIQUE
1.50 < L < 2.00
AMARRES EN ALAMBRE GALVANIZADO Ø >= 5mm
1.00 (max)
BIOMANTO DE FIQUE
PERFIL NATURAL DEL TERRENO
PERFIL TEÓRICO DE COLMATACIÓN
PANTALLA RETENEDORA DE SEDIMENTOS EN BAMBÚ
MATERIAL DE RELLENO
ESTACAS DE MADERA Ø 4" a 6" CADA 1.00m TERMINADAS EN PUNTA
1.50<L<2.00
.20(min)
.50 (min)
D
D = Ø 4" y 6"

FIGURA 10.22 Bermas o trinchos con estacas y postes.

10.3.1 BARRERAS PARA EL CONTROL DE SURCOS Y CÁRCAVAS

Trinchos en taludes

Los trinchos son elementos horizontales generalmente de madera o bambú soportados por estacas que tienen por objeto impedir la profundización y formación de surcos y cárcavas en los taludes con concentraciones altas de agua de escorrentía (Figura 10.22), el trincho previene el movimiento de sedimentos de la superficie del talud. Los trinchos pueden ser totalmente enterrados o pueden sobresalir por encima de la superficie del talud. Las estacas deben enterrarse hasta una profundidad generalmente superior a 50 centímetros, el espaciamiento entre trinchos varía de acuerdo a las características del talud, pero es normal tener espaciamientos entre 1.5 y 3 metros. Para la construcción de los trinchos se pueden utilizar estacas vivas y puede sembrarse vegetación entre ellos.

Barreras de piedra o de fajinas

Para lograr la sedimentación en canales se pueden colocar barreras de piedra o de vegetación, las cuales permiten el paso del agua pero impiden el paso de sedimentos gruesos. Debe tenerse en cuenta la necesidad de retirar los sedimentos a medida que se van colmatando las pequeñas represas.

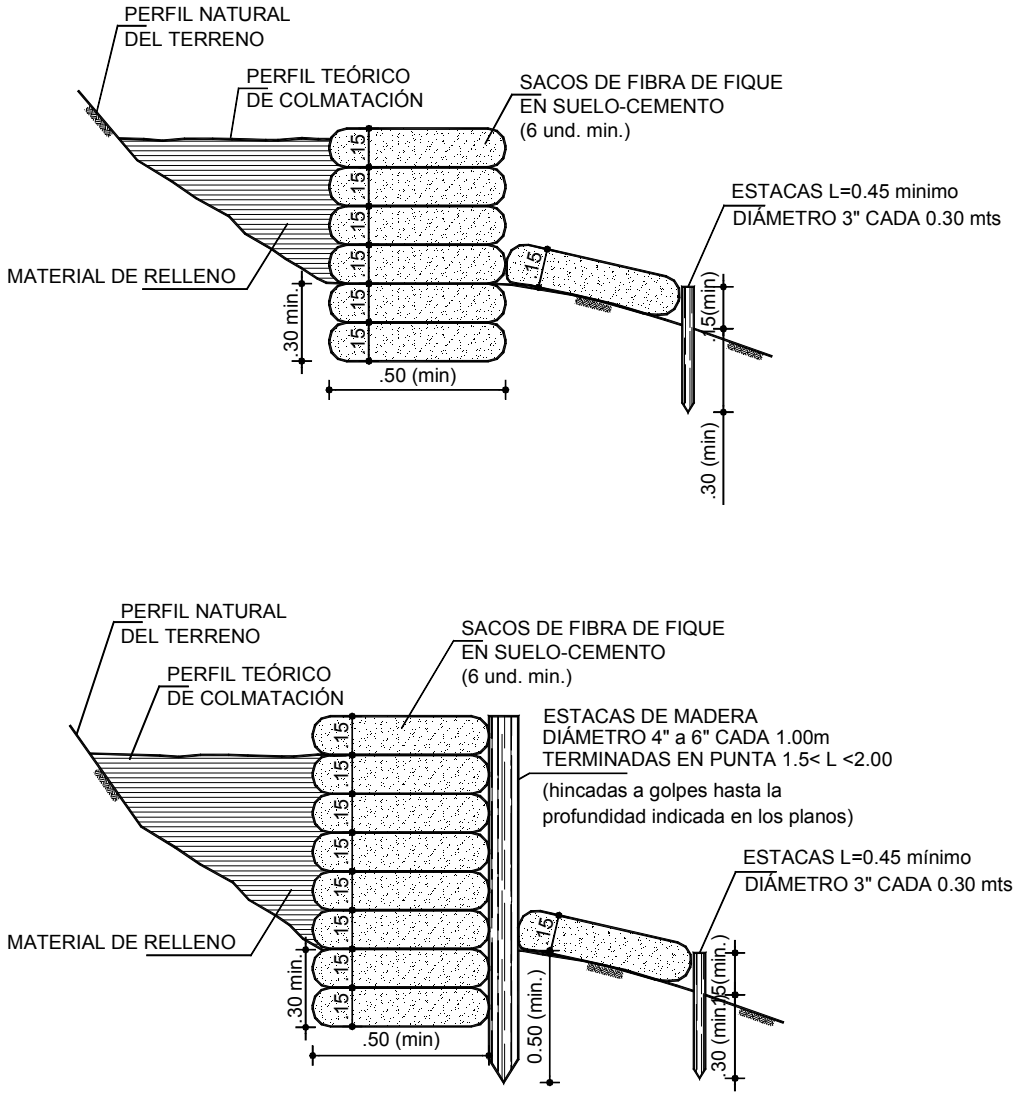


FIGURA 10.23 Bermas o trinchos en sacos de suelo cemento.

Barreras de rollos prefabricados de fibras orgánicas y/o sintéticas.

En el mercado internacional se ofrecen una gran variedad de rollos de fibra o "fajinas prefabricadas". Estos rollos son manufacturados con fibras orgánicas biodegradables envueltas en malla de fibras sintéticas u orgánicas. Su objetivo es utilizarlos como barreras para controlar la formación de surcos y cárcavas en el talud. Son materiales porosos, absorben agua y crean un ambiente favorable para el establecimiento de la vegetación. Se colocan a intervalos regulares para disminuir la longitud de los flujos libres de escorrentía a lo largo del talud y en las bermas para facilitar la transición de la pendiente.

Estos prefabricados orgánicos están diseñados para taludes con pendientes suaves (3 H : 1 V) y para distancias de flujo y caudales pequeños. Su propósito no es depositar sedimentos sino disminuir la velocidad del flujo del agua.

Recomendaciones para la colocación de fajinas prefabricadas

Para la instalación de las barreras de fibras se recomienda tener en cuenta las siguientes recomendaciones: (California RWQCB-SFBR, 1999)

- Conforme el talud finamente, si es necesario a mano, para remover desviaciones puntuales o remover grandes piedras o bloques que pueden impedir el contacto de la fajina con el suelo.
- Antes de instalar el rollo excave una zanja a lo largo de la línea de nivel de aproximadamente 100 mm de profundidad a lo largo de la ruta propuesta de instalación del rollo.
- Coloque las fajinas dentro de la zanja y coloque estacas a ambos lados del rollo a espaciamientos de 1.5 metros a lado y lado. Las estacas deben tener una longitud mínima de 60 centímetros. Asegúrese que se coloquen estacas cerca de las puntas de los rollos individuales.
- Cuando se coloquen dos rollos pegados, los rollos deben asegurarse a presión el uno contra el otro y en ningún momento traslaparse.
- Inspeccione los rollos en forma permanente y especialmente después de los eventos lluviosos y repare las fallas.

Barreras con geosintéticos (Silt Fences)

Son barreras verticales de geotextil apoyadas sobre postes hincados de poca altura. Su objetivo es filtrar el agua de escorrentía e impedir el paso de sedimentos de las obras en construcción. Generalmente se utilizan como obras provisionales para controlar los sedimentos durante la construcción.

Para la construcción de barreras con geosintéticos la AASHTO recomienda los siguientes criterios:

- Bajo ninguna circunstancia se permite la construcción de barreras con geosintéticos en canales de agua permanente o donde los flujos excedan un caudal de 0.028 m^3/seg.
- La vida útil de una barrera es aproximadamente cinco meses.
- La fibra de geosintéticos debe ser una tela porosa de polipropileno, nailon, poliéster o etileno que cumpla con los requisitos del FHWA para filtración y resistencia.
- Los postes para sostener las telas pueden ser de madera de 100 mm de diámetro o de hierro, con peso de 2 kg/m., con una longitud mínima de 1.5 metros.
- La altura libre de la barrera no debe exceder 0.9 metros.
- La tela debe ser continua y no se permiten uniones o traslapos.
- Los postes deben espaciarse máximo tres metros y deben enterrarse mínimo 0.6 metros.
- La zanja para enterrar al geotextil debe tener mínimo 200 mm de profundidad. Una vez colocada la tela debe rellenarse la zanja y compactarse adecuadamente.
- Cuando se utilizan telas estándar se debe colocar adicionalmente una malla y alambre para sostenerla.

Barreras de ramas

Son cúmulos de ramas que se colocan como retenedores de sedimentos. Estas barreras se colocan cerca del pie de los taludes en la construcción de carreteras (AASHTO 1999). Su altura es superior a un metro, y su ancho de 1.5 a 3 metros.

Para la construcción de barreras con ramas la AASHTO (1999) recomienda tener en cuenta los siguientes criterios:

- Solamente se deben utilizar en áreas de baja velocidad de flujo.
- La altura mínima de la barrera es de un metro.
- El ancho mínimo de la barrera es de 1.5 metros.
- La barrera debe construirse con ramas y raíces de hierbas y juncos cortados para la construcción de la obra.

- Arriba de la barrera debe excavarse una zanja de mínimo 100 mm de profundidad.
- Encima de la barrera debe colocarse una tela de filtro, asegurada mediante ganchos.

Barreras de enrocado

Son diques de poca altura para la sedimentación de residuos de suelos de una obra transportados por las corrientes efímeras de agua.

Para la construcción de estas barreras de piedra se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

- Debe utilizarse piedra entre 50 y 75 mm de diámetro.
- El área de drenaje no debe exceder 4 hectáreas.
- La altura máxima de las presas no debe ser mayor de 0.6 metros.
- El centro de la presa debe estar por lo menos 15 mm por debajo de los bordes.

Diques sedimentadores

Los diques sedimentadores represan cantidades grandes de agua para sedimentar los materiales arrastrados por el agua y en suspensión. Se pueden construir del tamaño que se requiera de acuerdo al área de la cuenca y los caudales de agua. Pueden construirse en corte o en lleno.(AASHTO 1999).

El sistema consiste en una presa, un área para sedimentación y un sistema de vertedero controlado. Para el diseño y la construcción de diques sedimentadores se recomienda tener en cuenta los siguientes criterios: (AASHTO 1999):

- La máxima área de drenaje recomendada es de 60 hectáreas.
- La capacidad de acumulación de la represa debe ser de mínimo 127 m^3. por hectárea de área de drenaje, medida por debajo del vertedero.
- Los sedimentos deben removerse de la represa cuando el volumen libre se ha reducido a 64 m^3 por hectárea de área de drenaje.
- En todos los casos no debe permitirse que el fondo del embalse esté por encima de un nivel de 0.6 metros por debajo de la cresta del vertedero.
- Si se desea una vida útil de más de 18 meses deben diseñarse como estructuras permanentes, siguiendo las metodologías de diseño de presas de tierra.
- La cresta de la presa debe tener un ancho mínimo de 2.5 metros y los taludes deben ser menores que 2H:1V, Para alturas de máximo 3.0 metros y 2.5H:1V para alturas hasta de 4.5 metros.
- Los vertederos deben diseñarse para un caudal de un periodo de retorno superior a 10 años, de acuerdo a los niveles de riesgo.
- Las velocidades máximas permitidas dependen del tipo de revestimiento y del sistema de vertedero utilizado.
- El relleno de la presa debe ser material de excelente calidad debidamente compactado.
- Previamente a la colocación del relleno de la presa debe limpiarse la zona de cimentación, retirando todos los materiales sueltos o con raíces.
- Los taludes deben revestirse para protección contra la erosión.
- Los taludes de la presa deben diseñarse en tal forma que la presa actúe como vertedero de emergencia sin sufrir daños importantes.

Mallas de alambre

En los taludes con bloques sueltos de roca que pueden caerse se acude con frecuencia a la colocación de mallas ancladas para sostener los bloques.

Para el diseño de mallas generalmente se acostumbra el siguiente procedimiento (Japan Road Association, 1984):

a. Determinar la sección del cable vertical para sostener el peso de la piedra de mayor tamaño.
b. Determinar la sección de los cables horizontales capaces de resistir el peso de las piedras que pueden caerse distribuyendo este peso a todo lo largo del cable entre dos puntos de anclaje.
c. Determinar el tipo y características de la malla capaz de resistir el peso de las piedras en las mismas condiciones del numeral b.
d. Calcular la resistencia y diseñar el anclaje asumiendo que toda la carga de cada cable es transmitida al ancla.

Barreras flexibles para retención de bloques

Estas barreras deben diseñarse para resistir el impacto de las piedras. La energía del bloque debe repartirse entre la energía absorbida por la malla, la absorbida por los cables y la absorbida por los postes de anclaje. Frecuentemente se combinan las mallas con una serie de elementos que absorben el impacto como son las llantas usadas o materiales de arena. Las energías y trayectorias de los bloques de roca son elementos esenciales para diseñar una estabilización y medidas de protección. Para este diseño existen algunos programas de Software de los cuales el más popular es desarrollado por el departamento de carreteras de Colorado (Wolcott 2001).

10.4 ESTABILIZACIÓN DE CÁRCAVAS

Las cárcavas se generan por la velocidad excesiva de corrientes concentradas. El control de la erosión en cárcavas incluye obras para el control de escorrentía, control del fondo de la cárcava y protección de la superficie del talud (Tabla 10.6)

TABLA 10.6 Obras para el control de erosión en cárcavas

Tipo de obra	Objetivo	Características
Estructuras para el control del fondo de la cárcava.	Impedir la profundización del canal de la cárcava.	Diques para control de pendiente o recubrimiento del fondo del canal.
Estructuras para la entrega de corrientes en el escarpe de la cárcava.	Disminuir la velocidad y turbulencia del agua en su paso por la cárcava.	Torrenteras y otras estructuras de entrega y/o estructuras de disipación en el pié del escarpe.
Protección o recuperación del área de la cárcava.	Aumentar la resistencia a la fuerza tractiva del suelo superficial.	Revestimiento con vegetación, o estructura de biotecnología.
Manejo de aguas de escorrentía.	Captación y desviación de las corrientes de agua.	Canales desviadores, cortacorrientes y estructuras de entrega y disipación.

10.5 CONTROL DE EROSIÓN DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE OBRAS CIVILES

La construcción de obras de ingeniería genera problemas graves de erosión y la producción de cantidades muy grandes de sedimentos. Al remover la vegetación para la construcción de las obras la superficie del terreno queda expuesta al golpeo de las gotas de lluvia y se producen fenómenos de erosión laminar, en surcos y en cárcavas como se indicó en los capítulos 1 y 2. Estos sedimentos son transportados por el agua de escorrentía hacia los cauces de agua ocasionando daños ecológicos enormes, especialmente a la fauna y flora de los cuerpos de agua. En los países desarrollados existe legislación muy estricta para obligar a los constructores a controlar tanto la erosión como los sedimentos(California RWQCB-SFBR 1999). En los países de América del sur los grupos ambientalistas están presionando por un control más estricto a esta fuente importante de contaminación, y se requiere mejorar tanto en la legislación como en el control.

Control de erosión en obras civiles en zonas tropicales

Los ambientes húmedos tropicales son particularmente vulnerables a cualquier alteración del medio ambiente. Existe una relación muy íntima entre los suelos y la vegetación. La remoción de la cobertura vegetal, así sea temporal genera un ciclo vicioso de degradación, el cual es muy difícil de romper.

El restablecimiento de la cobertura vegetal en zonas que han sido deforestadas presenta una serie de problemas especiales, debido especialmente a la falta de nutrientes que dificultan el establecimiento de la vegetación y a la gran intensidad de las lluvias que destruyen las obras de control de erosión antes de que se haya establecido totalmente la vegetación.

Para el manejo de obras de ingeniería civil en zonas tropicales se recomienda utilizar los siguientes criterios:

- No se debe remover la vegetación existente hasta el momento mismo de la construcción de la obra. Es irresponsable mantener expuesto el suelo durante períodos largos de tiempo.
- La vegetación es el mejor sistema de control de erosión en los trópicos. El control de sedimentos utilizando obras de ingeniería solamente no es eficiente para el control de la erosión. En todos los casos se requiere revegetalizar.
- Inmediatamente después de realizado el corte se debe fertilizar y sembrar utilizando sistemas efectivos de revegetalización (Ver capítulo 7).
- La revegetalización debe diseñarse utilizando especies nativas y limitando el uso de especies exóticas.

Plan maestro para el control de erosión en una obra

En la construcción de una obra donde se va a intervenir el suelo y la cobertura vegetal se debe diseñar un plan maestro para el control de la erosión.

La AASHTO recomienda seguir el siguiente procedimiento general:

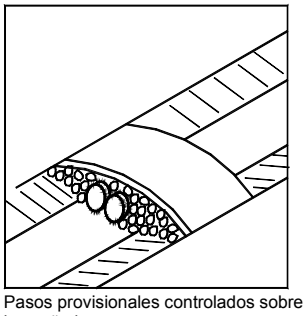
a. Determinar los límites de las áreas a intervenir. Debe decidirse exactamente que áreas deben ser intervenidas para construir la obra. Debe darse especial atención a áreas críticas de erosión que por alguna razón deben ser intervenidas.
b. Dividir el área de la obra en áreas de drenaje. Determinar como va ser el paso de escorrentía por encima del lote y como puede controlarse la erosión y la sedimentación en cada pequeña zona de drenaje.
c. Seleccionar los sistemas que se van a utilizar, los cuales se clasifican en tres grandes categorías:

1. Control de la erosión

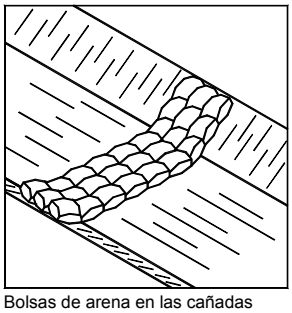
Practicas dirigidas a proteger la superficie del suelo y prevenir el desprendimiento de partículas por acción del agua y del viento.
Debe tenerse en cuenta que la vegetación es la mejor forma de control de erosión, sin embargo para su establecimiento se requieren prácticas adecuadas o revestimientos de protección.

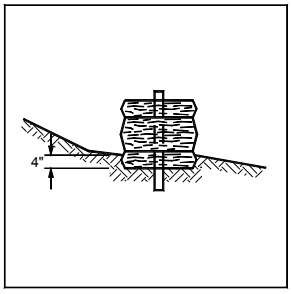
2. Control de sedimentos

Atrapar los sedimentos después de que han sido desprendidos por acción del agua y del viento. Son sistemas pasivos de sedimentación o filtración para evitar que los sedimentos producidos por la construcción lleguen a los cuerpos de agua (Figura 10.24).

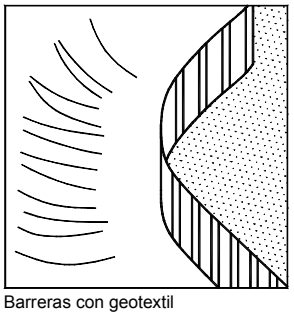

Pasos provisionales controlados sobre las cañadas

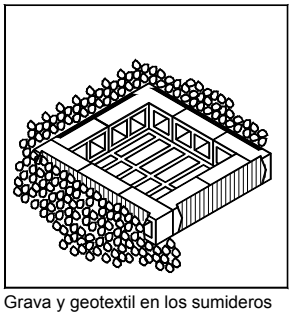
Lavallantas a la salida de la obra

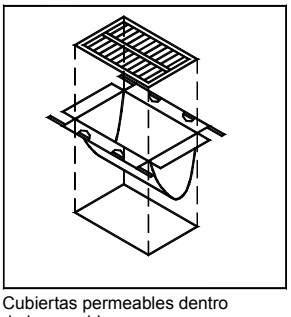

Bolsas de arena en las cañadas

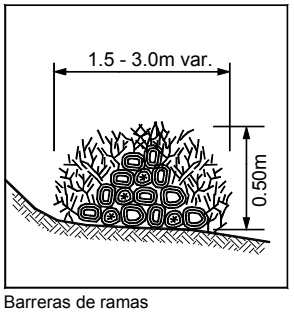


Barreras de paja


Barreras con geotextil


Grava y geotextil en los sumideros


Cubiertas permeables dentro de los sumideros



Barreras de ramas

FIGURA 10.24 Métodos para controlar los sedimentos en una obra en área urbana o suburbana.

Este tipo de obras deben seleccionarse, diseñarse y construirse adecuadamente.

3. Manejo adecuado de la obra

Este es tal vez el mejor sistema de control de erosión. La planeación de la secuencia de la construcción, el tiempo de exposición de las áreas a la lluvia, el mantenimiento y el control permanente son responsabilidades que deben asignarse a profesionales específicos dentro del grupo de trabajo, pero todos los profesionales y todos los obreros deben entender los procedimientos que se deben seguir para tener una obra sin problemas de erosión y sedimentación.

Normas generales de manejo

Se sugiere cumplir los siguientes lineamientos para mitigar el problema de erosión y sedimentación en las obras de ingeniería:

1. Corte los materiales de acuerdo al tipo de suelo y siguiendo las líneas de nivel de arriba hacia abajo, evitando taludes fuertes y deslizamientos.
2. Mantenga la vegetación en la mayor cantidad de área posible. No corte áreas que no se requiere intervenir.
3. Realice los cortes y llenos en temporadas secas (En Colombia los meses de Noviembre a Febrero).

TABLA 10.7 Control de erosión en construcciones civiles.

Actividad de control	Objetivos	Características
Preserve la vegetación existente.	Minimizar las áreas desnudas expuestas a la lluvia.	Elabore un cronograma de intervención. No corte hasta el momento en que realmente se requiere cortar. No realice toda la intervención al inicio de la obra. No intervenga la zona que no se va a construir. Guarde el suelo y la hierba del descapote para la resiembra.
Corte dejando gradas y rugosidades.	Disminuir la longitud de los taludes.	Construya zanjas y gradas en zonas intermedias de los cortes. Construya terrazas provisionales de control. Maneje las huellas de los equipos de oruga paralelamente a las líneas de nivel.
Revegetalice y proteja a medida que avanza la obra.	Disminuir el área y el tiempo de exposición a la lluvia y escorrentía.	Utilice sistemas de Mulching , biomantos o hidrosiembra. Vaya utilizando para resiembra el suelo vegetal y la hierba que debió salvar en el descapote. Utilice especies de rápida germinación y crecimiento y estacas vivas.
Proteja de la formación de nubes de polvo.	Disminuir la erosión por acción del viento.	Utilice agua permanentemente para mantener húmedas las áreas expuestas. Utilice compuestos como Cloruro de calcio, silicatos, sal, aceites vegetales, etc. (Ver capítulo 6 , productos para controlar el polvo).
Piscinas, lava-llantas en las porterías de acceso	Evitar que las llantas de los vehículos lleven sedimentos hacia fuera de la obra.	Piscinas en forma de batea, colocadas sobre la vía de acceso. Las llantas de los vehículos al pasar se lavan depositando los sedimentos. Deben limpiarse las piscinas todos los días para retirar los sedimentos depositados.
Estabilización de las superficies de carreteo.	Disminuir el polvo y evitar erosión por el tránsito.	Cubrir con material de subbase y base granular permanentemente las zonas de carreteo para impedir que los vehículos recojan barro y sedimentos.
Drenajes temporales en los taludes.	Evitar la formación de cárcavas.	Son mangueras flexibles o rígidas provisionales, que se colocan en los sitios de concentración de flujos, para conducir las aguas de arriba a abajo de los taludes, antes de que se construyan los drenajes definitivos..
Barreras de geotextil	Son cercas enterradas de geotextil para atrapar los sedimentos	En todos los sitios de salida de agua escorrentía de la obra se construyen cercas de geotextil soportadas por estacas, las cuales filtran el agua y detienen un porcentaje importante de sedimentos.
Obras diversas de atrape de sedimentos.	Sedimentar o filtrar los sedimentos antes de que el agua salga de la obra.	Barreras de piedra, barreras de ramas, barreras de bolsas de polipropileno llenas de grava y sistemas patentados de atrape de sedimentos.

4. Minimice la longitud de los taludes construyendo bermas intermedias para controlar la velocidad del agua de escorrentía.
5. Después de cortar vaya revegetalizando inmediatamente o colocando capas de protección de la superficie del terreno (Mulching). No deje áreas expuestas por más de 48 horas.
6. Construya zanjas de desvío de las aguas de escorrentía para alejarlas de las zonas expuestas.
7. Si hay sitios de concentración de agua a velocidades o turbulencias altas construya estructuras de disipación de energía.
8. Construya canales protegidos dentro de la obra para manejas las aguas concentradas.
9. Atrape los sedimentos utilizando piscinas o barreras antes de que salgan de la obra.
10. Inspeccione permanentemente la obra para tomar medidas de prevención y control.

Control de erosión durante la construcción de carreteras

Para la construcción de carreteras la AASHTO (1999) recomienda tener en cuenta los siguientes criterios específicos:

- Se debe colocar una cobertura definitiva para proteger las superficies expuestas de los taludes, dentro de los 15 días siguientes después de que se llegó a la cota definitiva en cualquier sitio del talud.
- Los depósitos de material deben recubrirse con membranas para evitar su erosión y alrededor de ellos deben colocarse trampas para prevenir el transporte de sedimentos.
- Debe colocarse vegetación permanente en todas las áreas denudadas.

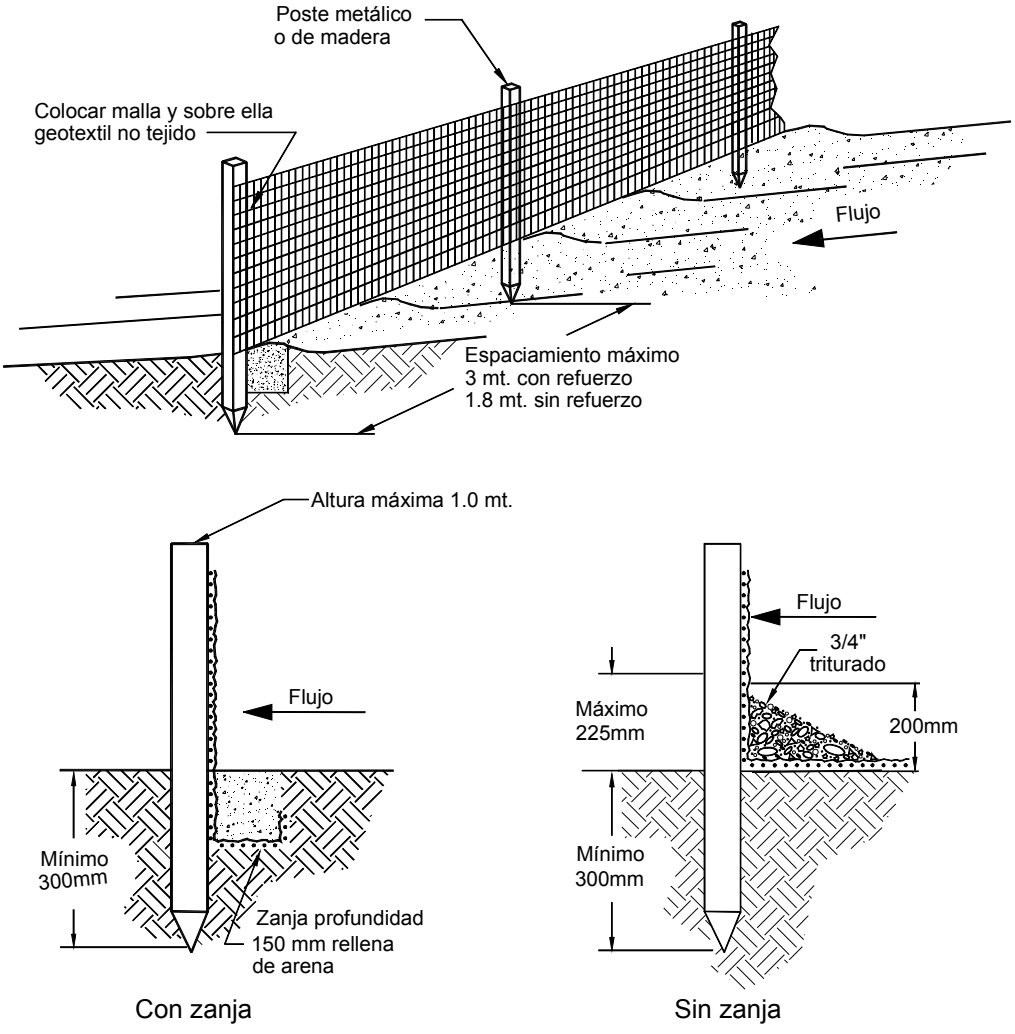


FIGURA 10.25 Barrera – filtro para sedimentos en la construcción de una obra (McCullah, 2001).

FOTOGRAFÍA 10.3 Manejo de aguas de escorrentía utilizando elementos prefabricados de concreto.

FOTOGRAFÍA 10.4 Barreras internas en zanjas de oleoductos enterrados

- Las áreas adyacentes a los sitios de obra deben protegerse utilizando barreras para sedimentos. Estas barreras deben construirse antes de iniciar los movimientos de tierra.
- Deben construirse ductos provisionales para llevar las aguas de las partes altas a las bajas. No debe permitirse el movimiento de flujos concentrados sobre los taludes no protegidos.
- Deben desviarse del sitio de obra todos los drenajes de áreas superiores a dos hectáreas, utilizando canales provisionales o permanentes.
- Si la zona intervenida cubre áreas muy grandes, deben construirse diques para el control de sedimentos, debidamente diseñados.
- No debe permitirse el cruce de vehículos directamente sobre las cañadas o corrientes de agua. Se recomienda la colocación de puentes provisionales.

Control de erosión en construcción de redes eléctricas

En el diseño y construcción de redes eléctricas se recomienda tener en cuenta las siguientes recomendaciones específicas (Cook y Hollifield, 1998):

- Diseñar la ruta para disminuir a un mínimo la DEFORESTACIÓN.
- Construir caminos de acceso por zonas con la mínima intervención posible del medio natural.
- Colocar grava sobre los caminos de acceso para disminuir la erosión.
- Construir puentes provisionales para el paso de los caminos de acceso sobre cañadas. Utilizar puentes desarmables portátiles.
- No cortar la vegetación sobre el derecho de vía, donde no sea estrictamente necesario (Figura 10.26). En lo posible cortar la vegetación solamente en los sitios de torre.
- Mantener siempre los arbustos y hierbas.
- No utilizar equipos pesados. Las licencias ambientales deben limitar el tamaño de los equipos a utilizar.
- Revegetalizar todos los sitios de torre.
- Colocar rápidamente la cimentación y la estructura para disminuir el tiempo de exposición del suelo desnudo a la lluvia.
- Una vez construidas las torres revegetalizar los caminos de acceso.

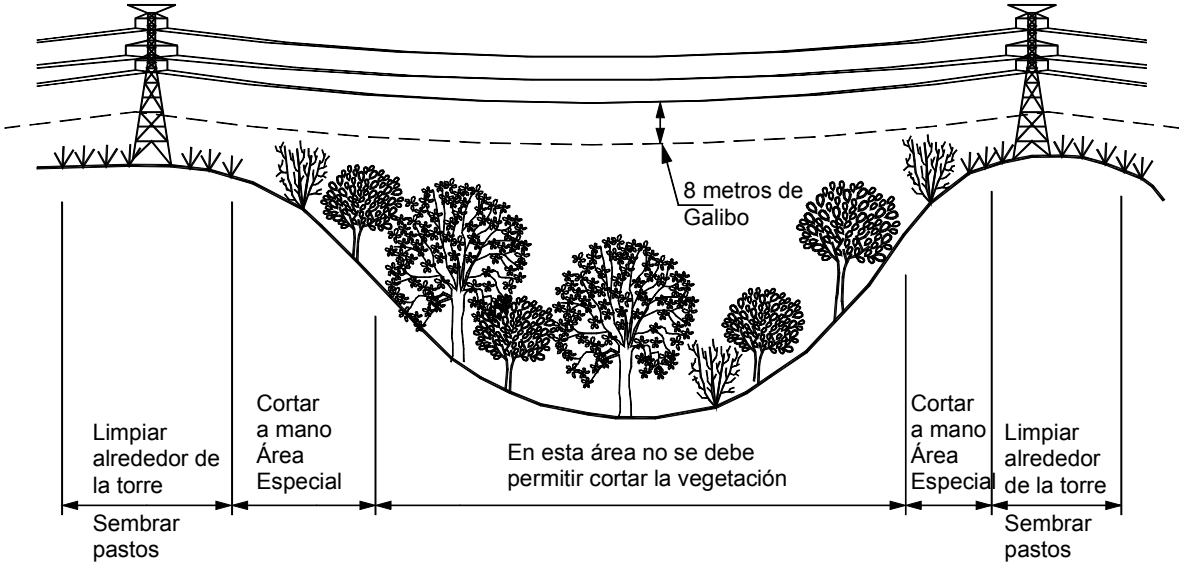


FIGURA 10.26 Sistema para la conservación de la vegetación en la construcción de líneas de conducción eléctrica (Cook y Hollifield, 1998).

10.6 PROTECCIÓN DE LOS TALUDES DE LAS CARRETERAS

La construcción de las vías de comunicación terrestre requieren de grandes cortes y grandes terraplenes con modificaciones sustanciales de la topografía y la eliminación de la cobertura vegetal protectora natural. Las carreteras son las obras de ingeniería que producen mayores volúmenes de erosión y de sedimentos.

Se requiere tomar una serie de medidas de control de erosión durante la construcción de la vía y diseñar y construir obras permanentes para al control de la erosión durante la vida útil de la vía (Transportation Research Board 1980) (Tabla 10.8).

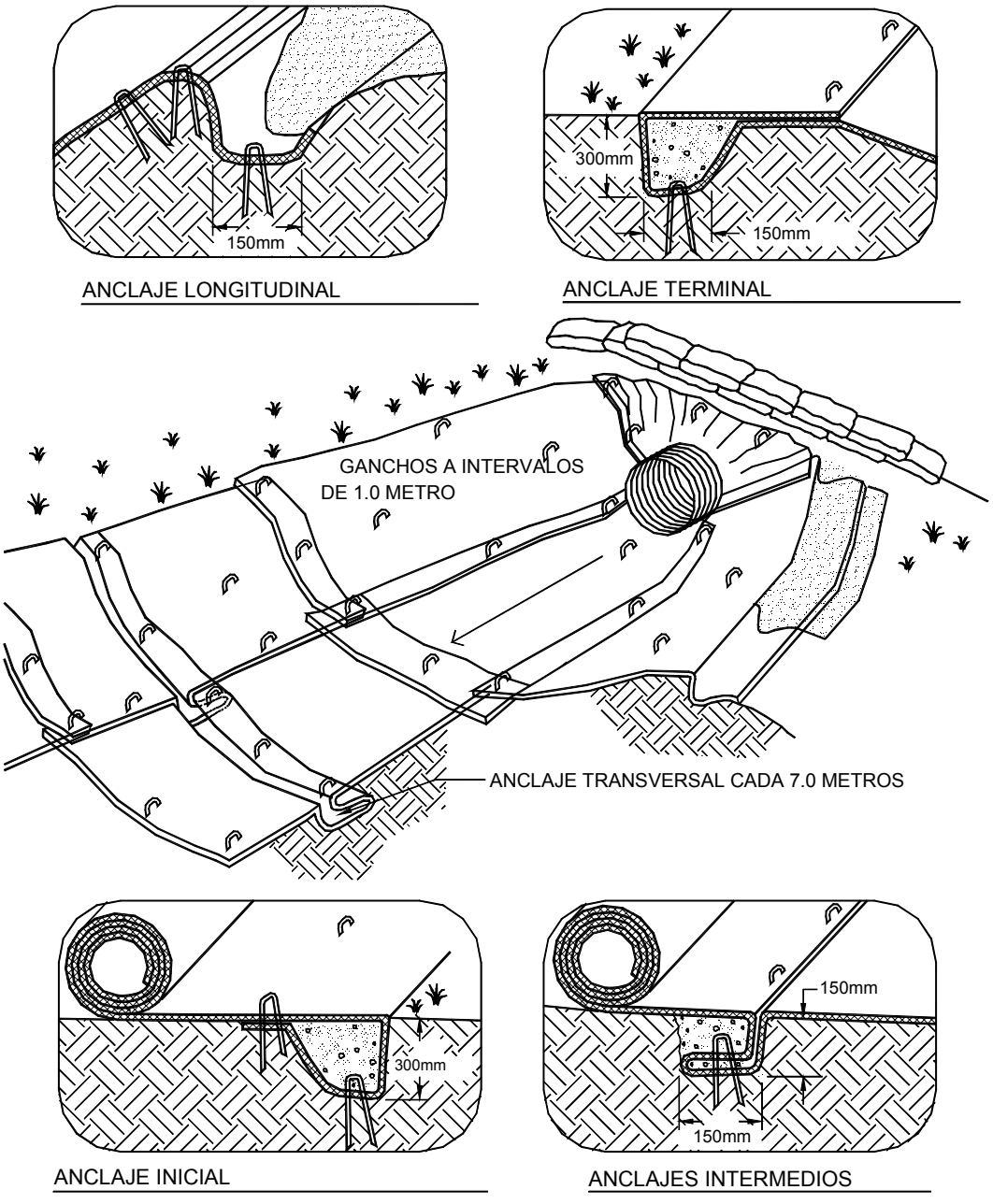


FIGURA 10.27 Protección de un canal a la entrega de una alcantarilla, utilizando un manto o esterilla (McCullah, 2001).

TABLA 10.8 Obras permanentes para el control de erosión en vías terrestres.

Tipo de obra	Objetivos	Características
Conformación de taludes en corte.	Disminuir la amenaza de deslizamientos de tierra y erosión.	Pendientes estables para movimientos en masa y para erosión en surcos y cárcavas. Debe complementarse con el control de aguas y la protección de la superficie de los taludes.
Conformación de terraplenes.	Disminuir la amenaza de hundimientos, falla de la banca y erosión.	Taludes estables de acuerdo a la calidad del material de suelo, contactos estables entre el lleno y la fundación, cimentación y subdrenajes que garanticen la estabilidad.
Bermas y gradas en los taludes	Controlar la erosión en surcos y cárcavas y mejorar la estabilidad a deslizamiento, tanto en los cortes como en los terraplenes	Construcción de gradas a bermas que garanticen velocidades aceptables de las aguas de escorrentía sobre el talud. El ancho y pendiente de las bermas deben ser suficientes para captar y conducir el agua a un sitio seguro.
Desvío de aguas arriba de los taludes.	Disminuir la escorrentía sobre el talud para evitar la formación de cárcavas y disminuir la infiltración.	Zanjas de buena capacidad y pendiente revestidas, localizadas a una distancia arriba de la corona que garantice su propia estabilidad.
Control de aguas dentro de los taludes.	Evitar la formación de surcos y cárcavas.	Cunetas, cortacorrientes, o estructuras para interceptar las aguas y/o disminuir la velocidad del flujo.
Cunetas en la vía	Controlar las aguas en la vía y evitar la infiltración y la erosión	Cunetas revestidas de capacidad suficiente para captar y conducir las aguas de escorrentía provenientes del talud y de la vía.
Bordillos	Controlar la erosión	Estructuras junto a la cuneta o la vía para evitar que las aguas se escapen y corran sobre los taludes.
Lavaderos	Conducir las aguas recolectadas por las cunetas y evitar la erosión.	Estructuras en forma de canal, la dirección de la pendiente del talud que conduzcan las aguas a estructuras de disipación de energía.
Estructuras de disipación de energía.	Conducir las aguas recolectadas y disipar su energía	Canales rugosos, graderías o cámaras de caída que disipen la energía del agua.
Control de la pendiente de los cauces.	Disminuir la erosión en los cauces o cañadas que atraviesan la vía.	Trinchos o estructuras de control de fondo de los cauces que permitan garantizar una pendiente estable.
Protección de la superficie de los taludes y vegetación	Controlar la erosión en surcos y cárcavas.	Revegetalización de la superficie de los taludes, surcos de vegetación o recubrimientos duros y blandos.
Estructuras colectoras y Alcantarillas.	Recolectar las aguas controlando la erosión.	Estructuras hidráulicamente diseñadas y convenientemente localizadas en tal forma que no se generen problemas graves de erosión.
Estructuras en el pie de las alcantarillas.	Evitar la formación de cárcavas en las entregas de las alcantarillas.	Revestimientos y estructuras de disipación aguas abajo de las alcantarillas, diseñadas en tal forma que se evite totalmente la formación de cárcavas de erosión.
Manejo de los sitios de Puentes.	Construcción de puentes en tal forma que no se produzca erosión ni sedimentación.	Localización adecuada de los puentes, luz suficiente, contracción mínima del cauce y estructuras de manejo de las aguas que eviten la socavación y no produzcan daños irreparables en la morfología del río.
Compactación adecuada de llenos	Control de la erosión y garantía de calidad de la calzada de la vía.	Compactación en capas sobre superficies planas con materiales de buena calidad que garantice el buen comportamiento del terraplén.
Subdrenes	Control de erosión y calidad de la calzada de la vía	Manejo de las aguas infiltradas y aguas subterráneas en tal forma que se garantice la estabilidad de la calzada, de los pavimentos y los taludes.

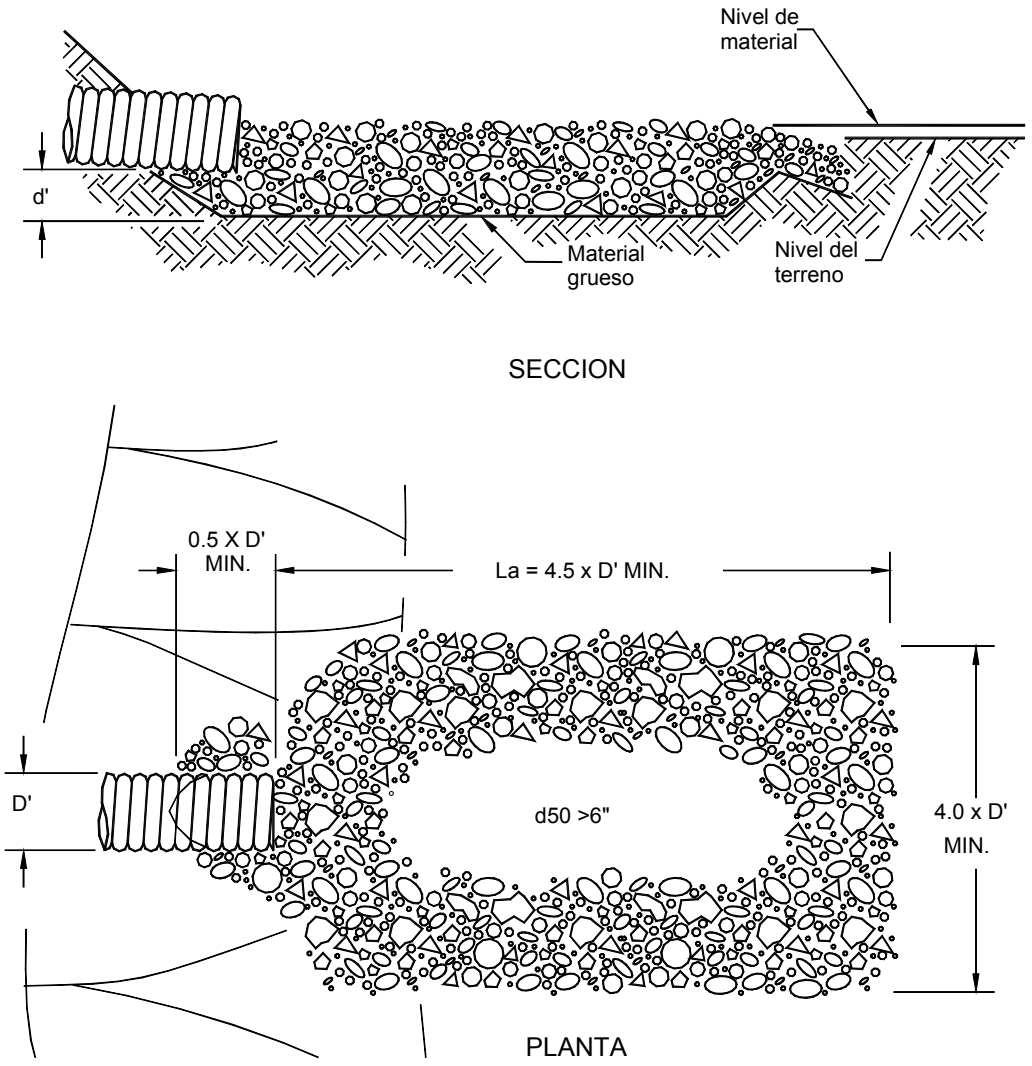


FIGURA 10.28 Protección con enrocado en la entrega de una alcantarilla o canal (McCullah, 2001).

Alcantarillas y box coulverts

Una alcantarilla tiene por objeto conducir el agua de un sitio a otro. El caso más común es el del paso del agua a través de una vía. Las alcantarillas deben tener suficiente capacidad para transportar el agua esperada y suficiente resistencia para soportar las cargas de trafico, cargas muertas, etc.

Es importante para toda alcantarilla determinar el área de drenaje con mucho cuidado para poder calcular los caudales máximos recogidos. Igualmente se debe analizar el uso de la tierra en el área de drenaje.

Generalmente las alcantarillas se construyen en el sitio donde existían cañadas o corrientes no permanentes de agua. En estos casos la alcantarilla debe diseñarse para que tengan una mayor capacidad de transporte de sedimentos que la corriente misma, con el objeto de impedir sedimentación dentro de la alcantarilla.

La alcantarilla debe diseñarse como canal abierto y no debe permitirse que trabaje a presión. Dentro de la alcantarilla no debe existir un cambio de pendiente mayor a menor para impedir sedimentación.

Diseño de alcantarillas

Las alcantarillas y box coulvert se diseñan para que tengan la sección suficiente para el paso del caudal de diseño sin causar daño a los terraplenes o al suelo contiguo. En la practica, según el TRRL (1992) esto se logra limitando la altura de la inundación en el lado aguas arriba de la alcantarilla. El área requerida de alcantarilla es el área requerida para permitir un flujo

que mantenga la cabeza de agua, aguas arriba del box por debajo del nivel crítico. La cabeza aguas abajo se toma como el nivel de la creciente antes de construir el terraplén o la parte superior de la alcantarilla, el valor más alto entre los dos (TRRL, 1992).

La cabeza de operación H se define como $h_u - h_d$.

Donde h_u es la cabeza aguas arriba y h_d es la cabeza aguas abajo.

La cabeza H es igual a la suma de las perdidas de cabeza en la alcantarilla.

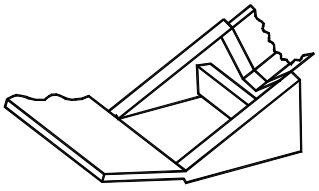
$$H = h_e + h_f + h_o$$

Donde h_e es la pérdida en la entrada, h_f es la pérdida por fricción y h_o es la perdida en la salida.

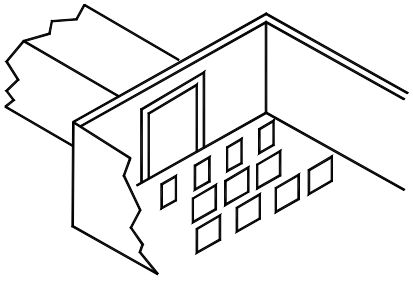
Estas perdidas se pueden calcular con las siguientes expresiones:

$$h_e = k_e \cdot \frac{V^2}{2g}$$

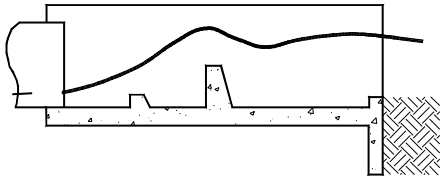
$$h_o = k_o \cdot \frac{V^2}{2g}$$



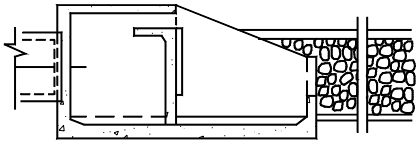
Virginia Departament of Highways and Transportation



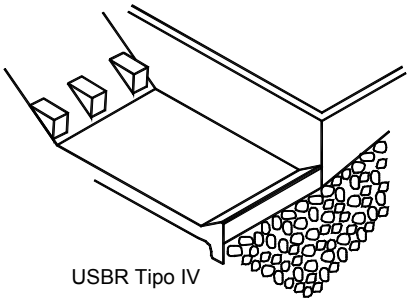
Colorado State University



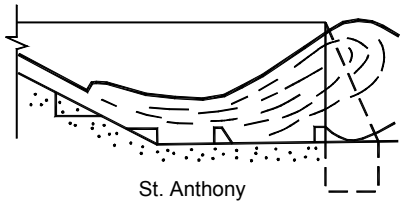
Contra Costa Country, Calif.



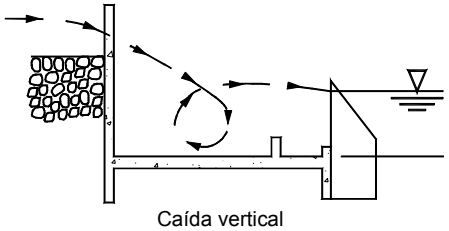
USBR Tipo VI



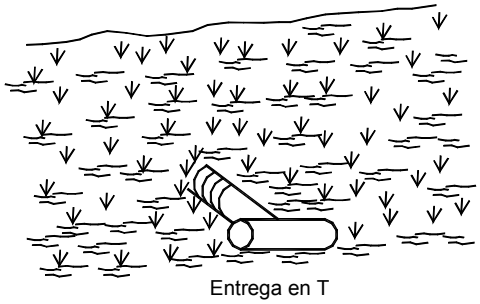
USBR Tipo IV



St. Anthony



Caída vertical



Entrega en T

FIGURA 10.29 Alternativas de disipadores de energía en entregas de alcantarillas (North Carolina Erosion Control Manual).

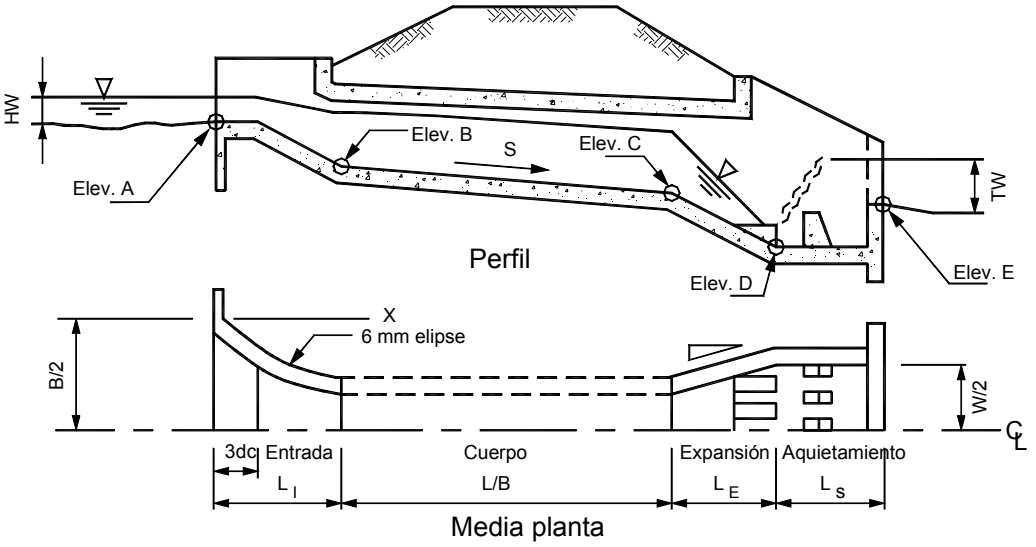


FIGURA 10.30 Dimensiones a diseñar para la disipación de energía en un box coulvert (AASHTO, 1999).

$$h_f = f.\frac{L}{D}.\frac{V^2}{2g}$$

Donde:

V = Velocidad de flujo (m/seg.)
g = Aceleración de la gravedad (m/seg²)
D = Diámetro interno de la alcantarilla (m)

Para box coulvert de concreto se puede asumir los siguientes valores;

K_e = 0.15
f = 0.016
K_o = 1.0 (para todo tipo de alcantarilla)

Para alcantarillas metálicas corrugadas

K_e = 0.9 y f = 0.075

Protección de entregas de alcantarillas

Se deben diseñar y construir mantos protectores y estructuras de control para la protección de la salida y entradas de alcantarillas para prevenir la erosión.

Fletcher y Grace(1974) recomiendan construir un canal revestido con taludes laterales 2H : 1V y longitud 5 veces la altura del box. Al final del canal se debe enterrar el revestimiento

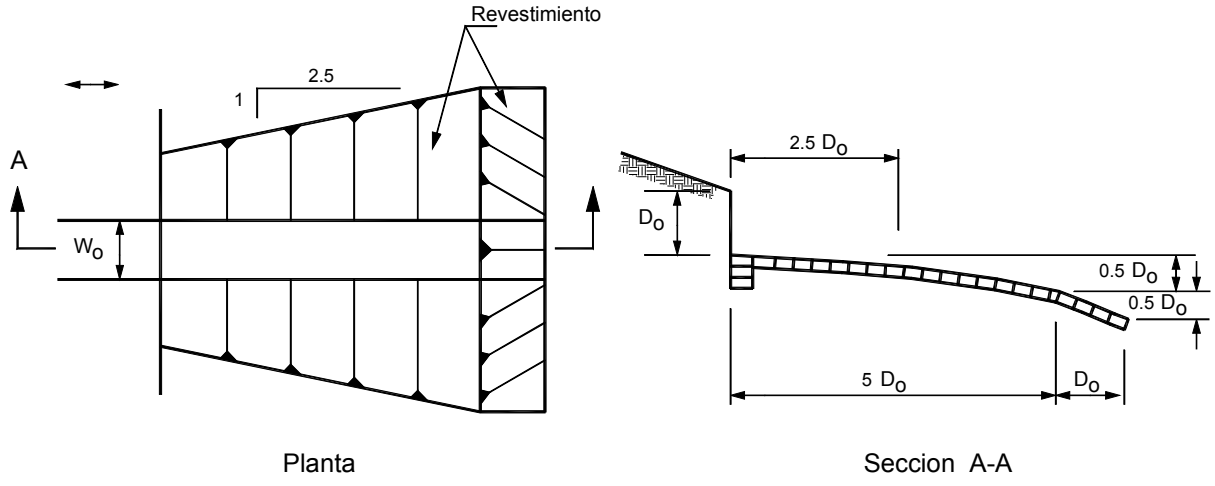
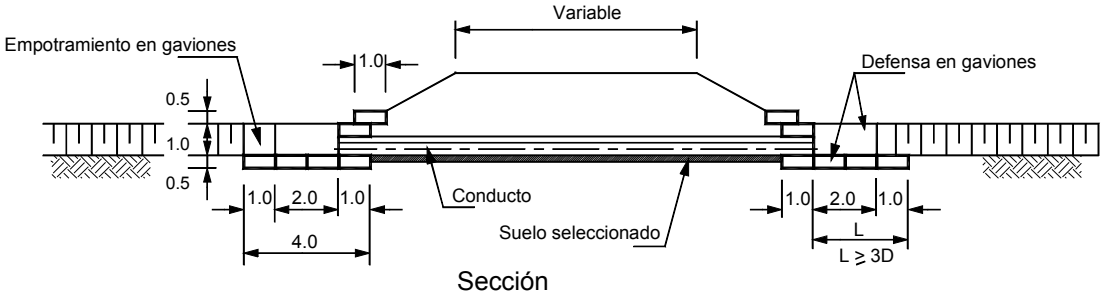
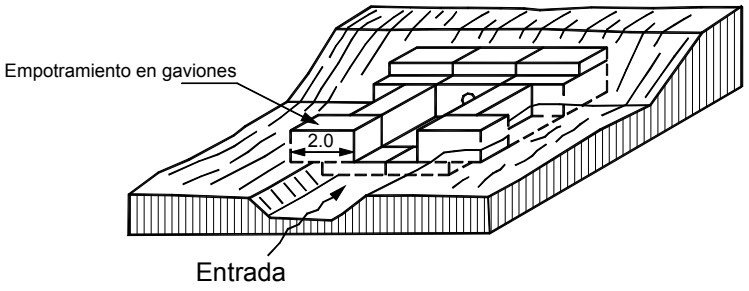


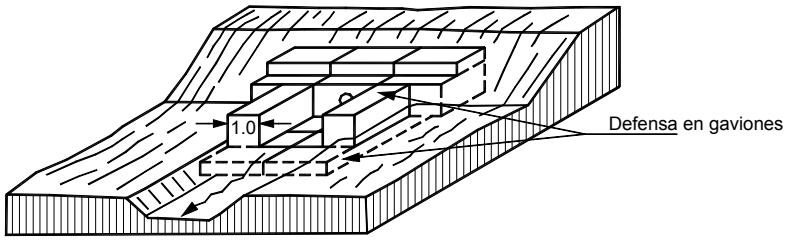
FIGURA 10.31 Canal revestido debajo de box coulverts de acuerdo a recomendación de Fletcher y Grace (1974).



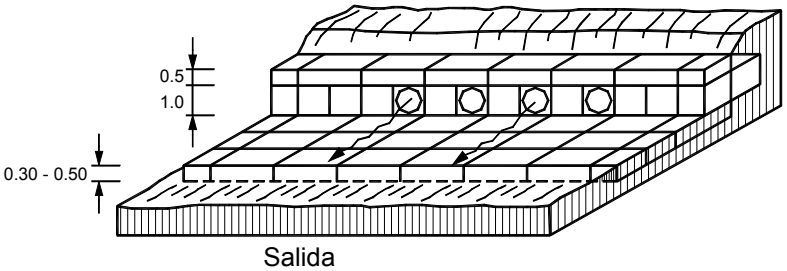
Sección



Entrada

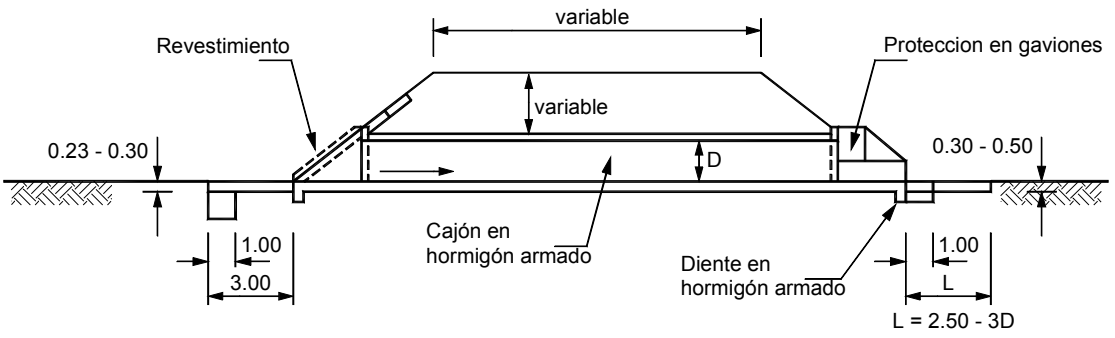


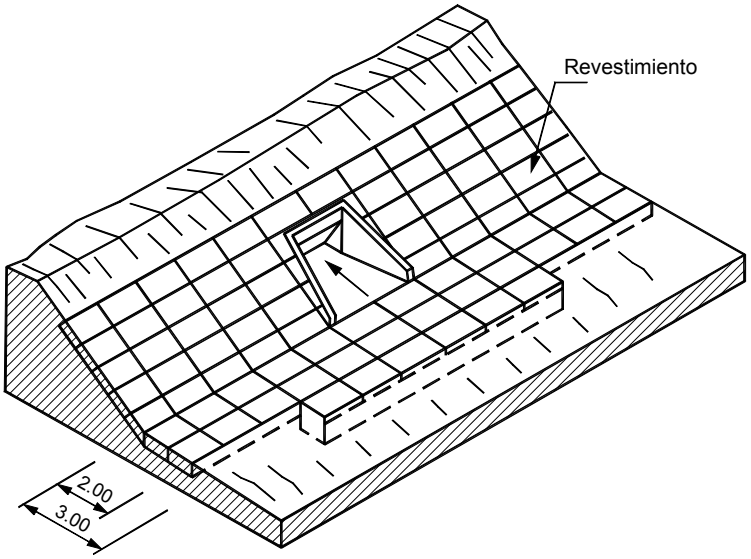
Salida



Salida

FIGURA 10.32 Protección en gaviones para alcantarillas en tubería.





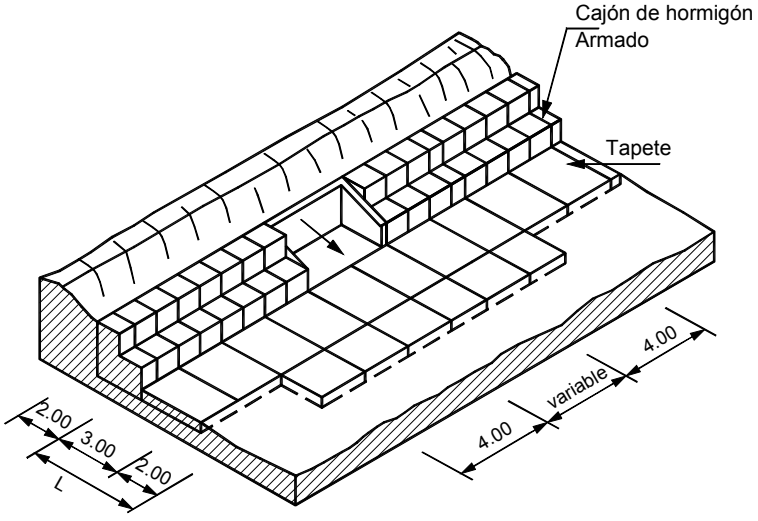


FIGURA 10.33 Protección en gaviones para box coulverts.

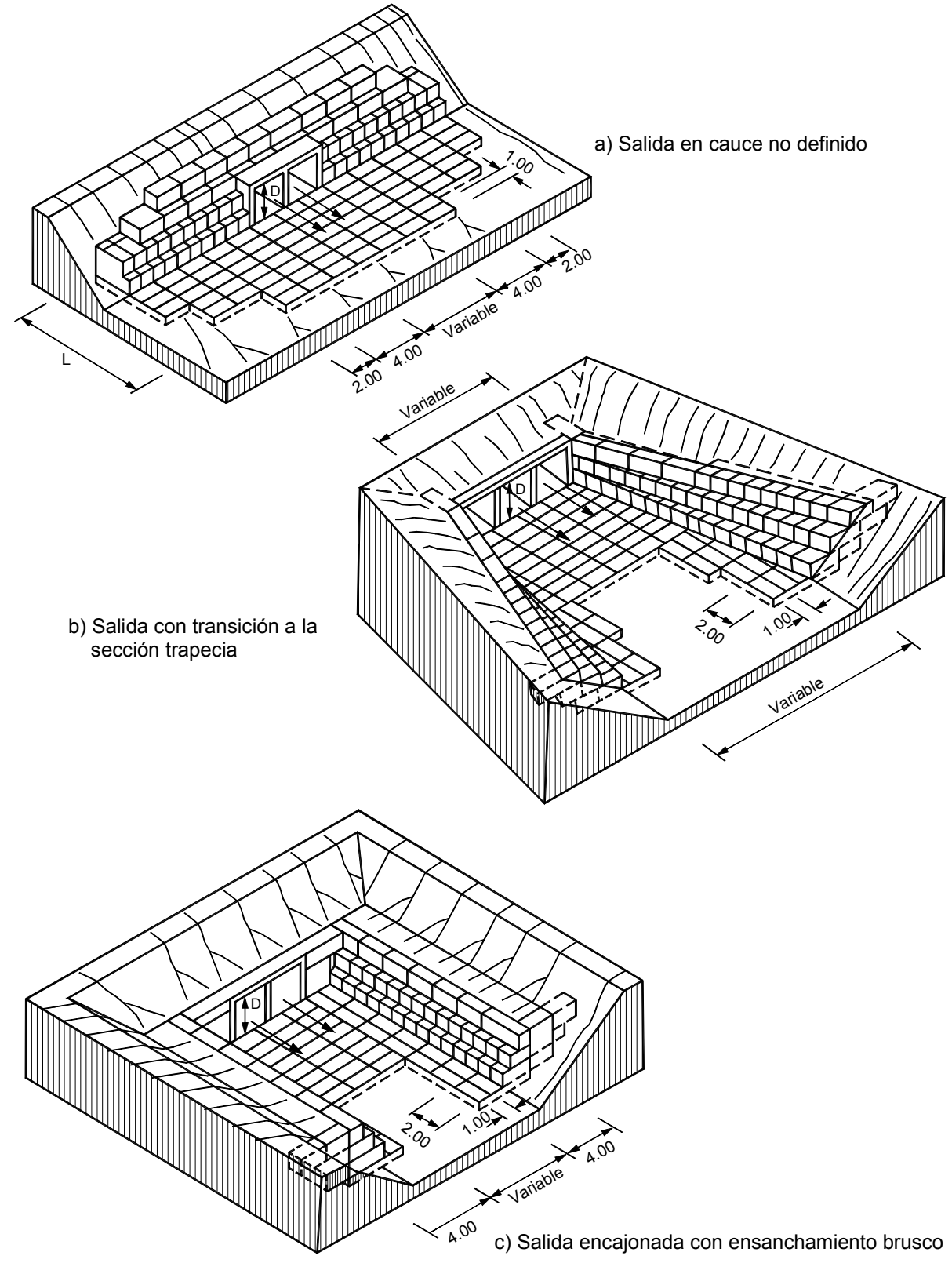


FIGURA 10.34 Protección en gaviones para box coulverts compuestos.

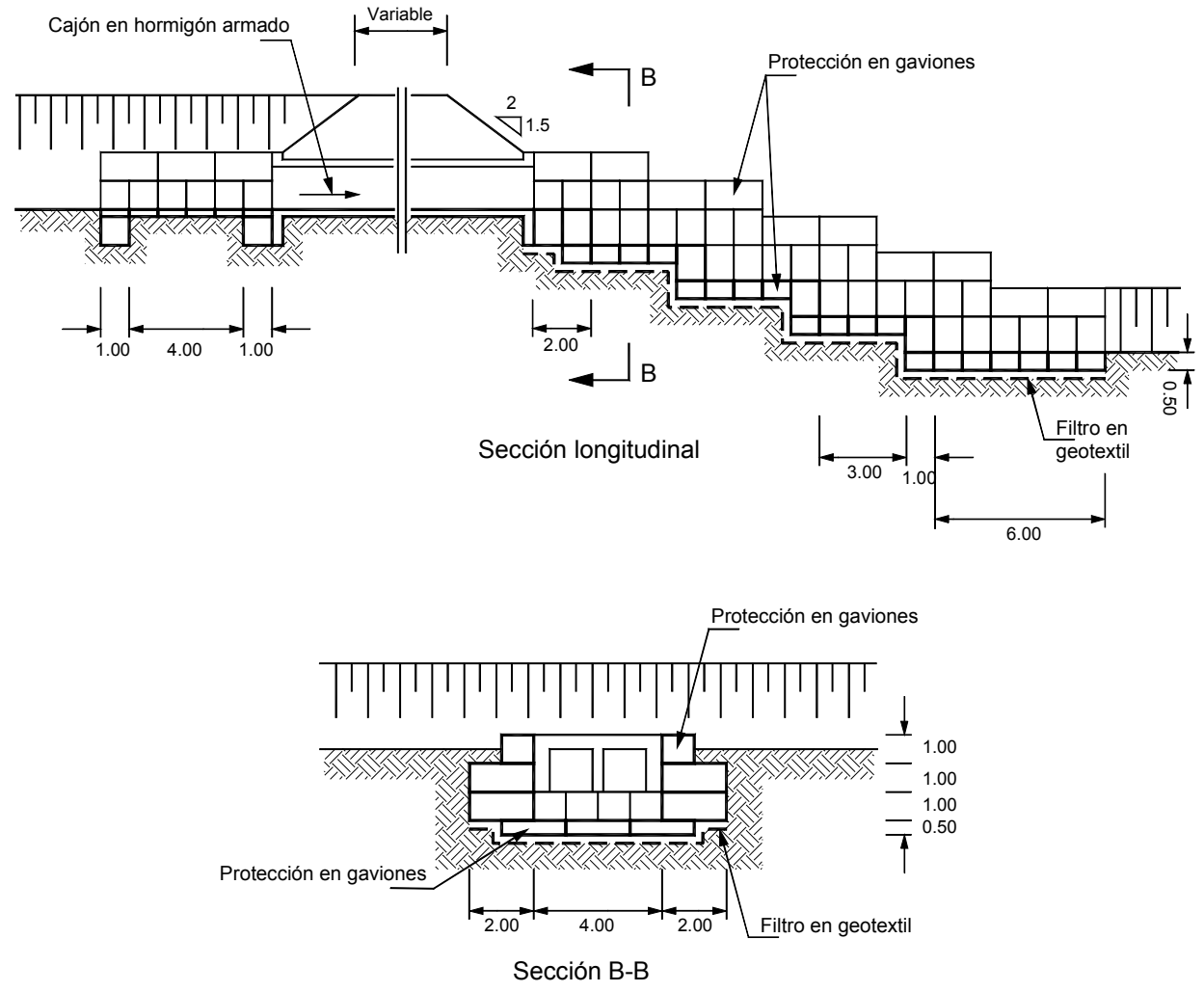


FIGURA 10.35 Protección en gradería para box coulverts.

10.7 PROTECCIÓN DE DERECHOS DE VÍA DE OLEODUCTOS

Los oleoductos y gasoductos requieren de la conformación de un derecho de vía DDV a lo largo del cual se colocan los ductos, tanto enterrados como expuestos sobre la superficie. Para la construcción del derecho de vía se requiere realizar cortes y rellenos y la remoción de la vegetación original.

Espaciamiento de Cortacorrientes

El espaciamiento de los cortacorrientes depende de los siguientes factores:

a. Intensidades máximas de las lluvias
b. Pendiente del derecho de vía
c. Erosionabilidad del suelo del DDV
d. Cobertura vegetal.

Se han elaborado tablas y gráficas para determinar la separación entre cortacorrientes en derechos de vía de oleoductos (Figura 10.37).

Control de erosión interna en las zanjas

Las zanjas dentro de las cuales se colocan los ductos pueden tener grandes pendientes y longitudes y a lo largo de ellas se forman corrientes internas de agua,

TABLA 10.9 Obras para el control de erosión en derechos de vía de oleoductos.

Tipo de obra	Objetivos	Características
Cortes para conformación del DDV.	Uniformización de la pendiente. Disminución de la pendiente.	Eliminación de cambios bruscos de topografía. Conformación de una pendiente estable.
Rellenos para conformación del DDV.	Conformación de una pendiente uniforme.	Relleno de depresiones y construcción de rellenos para disminuir la pendiente.
Control lateral de lomos de colinas.	Controlar la erosión y deslizamientos a lado y lado del lomo.	Muros en gaviones, piedra o tierra reforzada, trinchos con estacas o postes profundos. Subdrenes.
Cortacorrientes.	Disminuir la longitud de recorrido y velocidad del agua.	Canales o diques transversales al derecho de vía para recolectar y conducir lateralmente el agua.
Canales longitudinales.	Colección, manejo y entrega de las aguas recolectadas.	Canales revestidos en suelo-cemento, concreto o vegetación.
Entregas de los canales.	Disipar la energía del agua en la entrega.	Ampliación de los canales, bloques disipadores o estructuras de disipación.
Protección de la superficie del DDV.	Control de la erosión por golpeo de la lluvia, laminar, en surcos y cárcavas.	Obras de bioingeniería o de biotecnología.
Control de erosión interna en las zanjas de ductos.	Controlar las corrientes de agua que se forman a lo largo de las zanjas.	Cortacorrientes internos y subdrenes.
Pasos Subfluviales	Proteger el ducto de la erosión producida por la corriente.	Zanjas profundas, elementos de protección dentro de la zanjas y estructuras laterales junto a la corriente.
Manejo de corrientes transversales.	Control de la erosión en las cañadas y torrentes.	Estructuras de control lateral y de fondo de las corrientes.

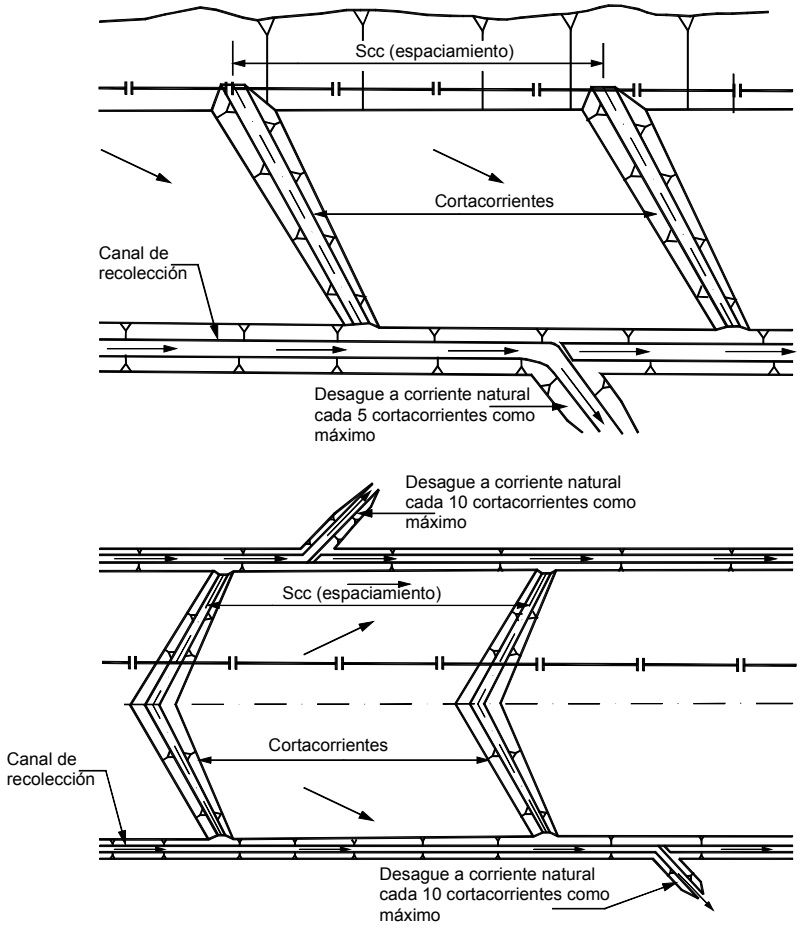

Scc (espaciamiento)
Cortacorrientes
Canal de recolección
Desague a corriente natural cada 5 cortacorrientes como máximo
Desague a corriente natural cada 10 cortacorrientes como máximo
Scc (espaciamiento)
Cortacorrientes
Canal de recolección
Desague a corriente natural cada 10 cortacorrientes como máximo

FIGURA 10.36 Esquemas típicos de localización de cortacorrientes en derecho de vía de oleoductos (Ecopetrol Ingeniería y Geotecnia).

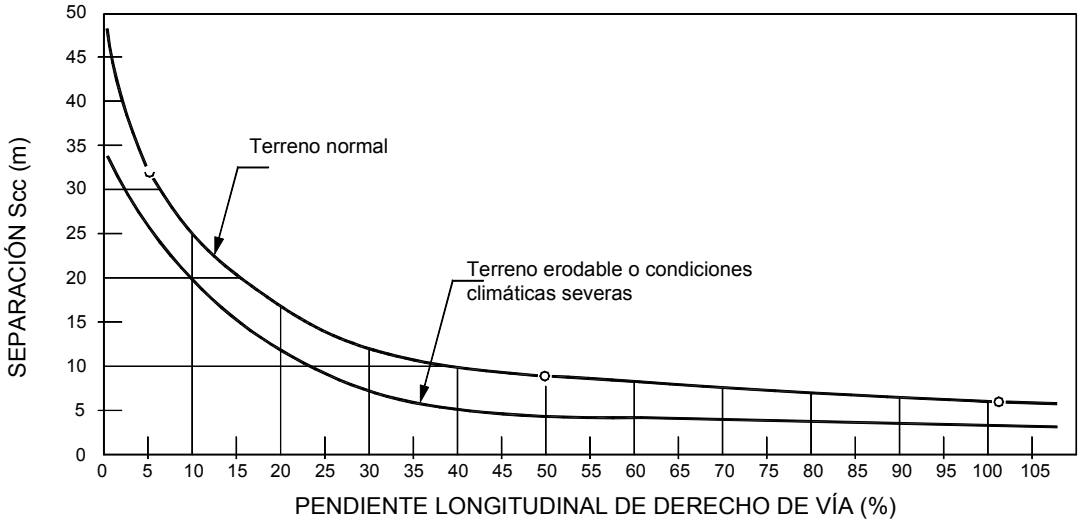

SEPARACIÓN Scc (m)
PENDIENTE LONGITUDINAL DE DERECHO DE VÍA (%)
Terreno normal
Terreno erodable o condiciones climáticas severas
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50
0 5 10 15 20 25 30 35 40 45 50 55 60 65 70 75 80 85 90 95 100 105

FIGURA 10.37 Separación de cortacorrientes en derechos de vía de oleoductos (Ecopetrol Ingeniería y Geotecnia).

las cuales pueden adquirir velocidades muy grandes y producir cárcavas internas de erosión, las cuales pueden afectar la estabilidad del ducto.

Para controlar la erosión interna se utilizan barreras internas para bloquear la corriente y disminuir la velocidad del agua y subdrenes colectores para sacar el agua interna hacia la superficie del terreno.

1. Barreras internas

Consisten en estructuras y muros construidos en materiales resistentes a la erosión. Estas barreras son estructuras disipadoras de velocidad.

2. Subdrenes colectores

Los subdrenes colectores captan las corrientes internas de agua y las sacan a la superficie para su entrega a los canales.

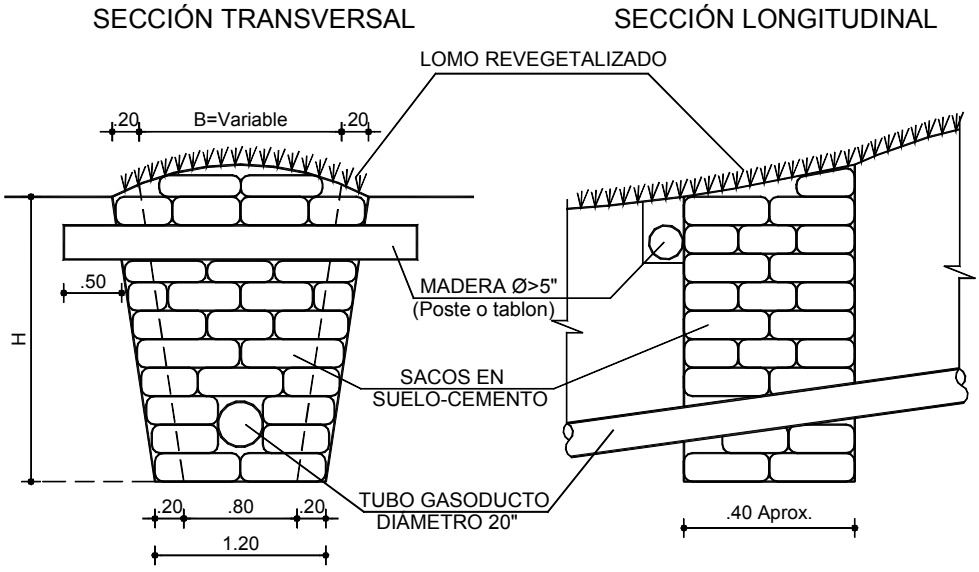


FIGURA 10.38 Barreras internas en zanjas de oleoductos.

10.8 CONTROL DE EROSIÓN EN ZONAS URBANAS

Los asentamientos humanos son grandes depredadores del medio ambiente y grandes generadores de erosión y se requiere planear, diseñar y construir sistemas para el control de la erosión y de la contaminación.

10.8.1 ÁREAS DE AMORTIGUACIÓN JUNTO A LAS CORRIENTES DE AGUA (RIPARIAN BUFFER)

Las zonas de amortiguación se diseñan sistemáticamente en las zonas urbanas para crear o mantener corredores verdes a lo largo de las riberas de las corrientes de agua y los ríos (Figura 10.39). El objetivo principal es mitigar el impacto negativo del asentamiento humano sobre la calidad del agua y del aire y proteger la fauna y la flora propias de las cañadas y ríos.

Para formar estos corredores los municipios deben comprar o crear sistemas para entrega de unas áreas amplias alrededor de los cuerpos de agua.

Objetivos de las zonas de amortiguación

Los objetivos de las zonas de amortiguación son los siguientes:

TABLA 10.10 Control de erosión en zonas urbanas.

Actividad	Objetivos	Características
Áreas de amortiguación junto a las corrientes de agua (Riparian Buffer).	Son áreas de vegetación entre las corrientes de agua y las zonas de desarrollo urbano diseñadas específicamente para el tratamiento natural del agua y del aire.	Áreas alargadas anchas con cobertura de vegetación completa donde no se permite el acceso a las personas.
Protección y construcción de bajos o pantanos dentro de las zonas urbanas	Proveer rutas específicas y concentraciones controladas de los flujos de agua. Sobre las zonas de bajos o cañadas efímeras no deben permitirse construcciones.	Zonas destinadas exclusivamente a la infiltración y el flujo de agua. Pueden recubrirse con enrocados o vegetación
Aislamientos de los taludes y de los cuerpos de agua.	Garantizar la estabilidad de las construcciones a largo plazo evitando que el deterioro de los taludes y la erosión de las corrientes pueda representar una amenaza para los bienes y la vida de las personas.	Distancias prudenciales de la corona y del pie de los taludes y de las orillas o líneas de inundación. Estas distancias mínimas deben ser: D = H del talud tanto en el pie como en la corona. D = Ancho del río desde la línea de inundación.
Manejo de zonas verdes	Las zonas verdes se deben diseñar en tal forma que representen un sistema de control de la contaminación tanto del agua como del aire.	Diseño de zonas verdes de acuerdo a la morfología del terreno con anchos suficientes para garantizar la permanencia de la cobertura vegetal
Manejo de Residuos sólidos y basuras	Eliminar o mitigar la contaminación	Deben diseñarse sistemas de recolección y disposición tanto de basuras como de otros tipos de residuos sólidos.
Manejo de aguas servidas	Eliminar o mitigar la contaminación del agua	Diseño y construcción de sistemas de alcantarillado independientes para aguas limpias y aguas servidas, plantas de tratamiento para las aguas servidas y lagunas de sedimentación para las aguas lluvias.
Manejo del polvo urbano	Disminuir la contaminación del aire y proteger la flora y la fauna	Construcción de zonas amplias forestales alrededor de las autopistas, fábricas y zonas de producción de polvo fugitivo.

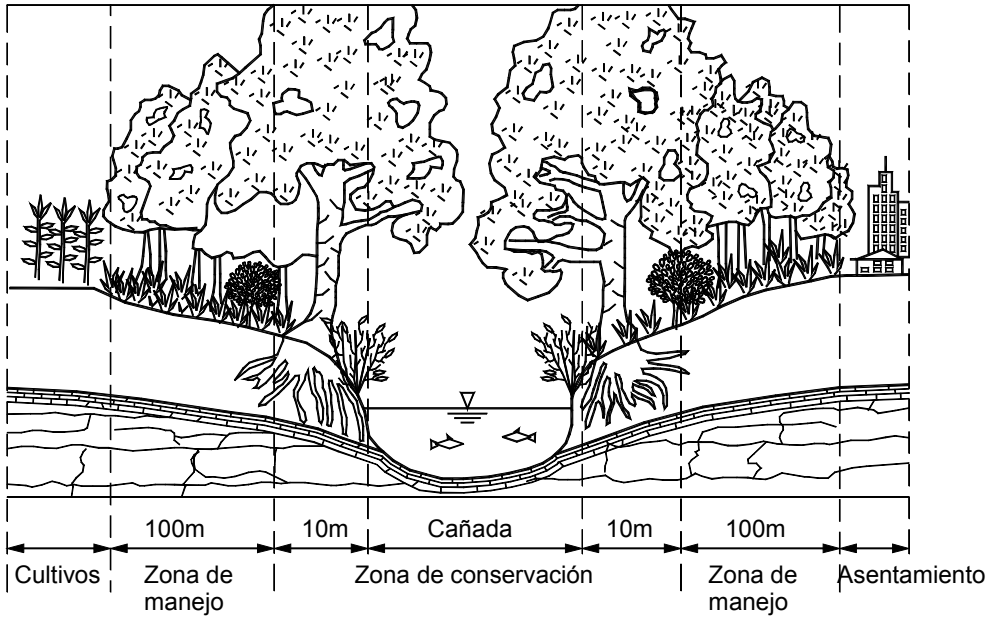


FIGURA 10.39 Esquema de zona de amortiguación junto a un cuerpo de agua (Kansas Department of Environment).

1. Preservación de las zonas húmedas y los planos de inundación.

Los planos de inundación junto a los ríos y corrientes son críticos para el control de la cantidad y calidad del agua de escorrentía. Las zonas alrededor de los ríos actúan como humedales para garantizar el agua durante las temporadas secas.

2. Estabilizar las riberas de los ríos y controlar su erosión.

Al preservar las hierbas, pastos y plantas a lo largo de la orilla se disminuye la erosión de la ribera y del fondo de los canales. Esta vegetación también ayuda a mantener la temperatura del agua y crear un habitat para las especies acuáticas y terrestres.

3. Reducir los volúmenes de escorrentía.

Las zonas de amortiguación «Riparian buffer» reducen ostensiblemente las velocidades y caudales de la escorrentía al interceptar los flujos y disipar la energía.

4. Reducir las cargas de contaminantes.

Dependiendo del diseño de la zona de amortiguación se puede reducir la concentración de contaminantes tanto en el agua como en el viento. Este efecto depende de varios factores entre ellos las características del suelo y la vegetación y el tamaño y pendiente de la zona de amortiguación.

Diseño de las zonas de amortiguación

Las zonas de amortiguación junto a los cuerpos de agua debe diseñarse para acomodar todos los objetivos como son el manejo de aguas, el habitat para las especies, la estabilización de las riberas y el control de erosión. Estos objetivos se complementan los unos con los otros.

Debe tenerse en cuenta que para cada sitio específico la zona de amortiguación puede diseñarse en forma diferente.

Para el diseño del ancho de la zona de amortiguación debe tenerse en cuenta los siguientes criterios (Herson-Jones y otros, 1995):

- El ancho mínimo de la zona de amortiguación debe ser superior al ancho del río o corriente.
- El ancho mínimo necesario para mantener una sombra adecuada sobre el río debe ser de dos veces el ancho de la especie de árbol más alto.
- El ancho mínimo necesario para mantener la fauna silvestre es de aproximadamente 100 metros.

Para el diseño de la zona de amortiguación debe tenerse en cuenta además los siguientes factores:

- Construcción de cercas y corredores para impedir o regular el paso de las personas.

- Diseño del tipo, densidad y composición de la vegetación.
- Manejo de las aguas de inundación.
- Estructuras para la disipación de energía del agua.

10.8.2 PROTECCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE BAJOS Y PANTANOS (SWALES)

Dentro de los proyectos de desarrollos urbanos se deben dejar libres todas las áreas de corrientes efímeras y bajos o pantanos, los cuales deben protegerse para permitir la infiltración y la descontaminación. Estas zonas deben revegetalizarse y se deben construir sistemas que faciliten la infiltración del agua.

10.8.3 CONTROL DE EROSIÓN EN ÁREAS DE RECREACIÓN PASIVA

Los parques naturales con acceso de población humana son zonas vulnerables a la erosión por la misma acción antrópica, el pisoteo, los daños directos a las ramas de arbustos y árboles, el depósito inadecuado de basuras y el fuego son uno de los factores que más inciden en la erosión de áreas de recreación pasiva. Algunas especies vegetales no resisten el daño incluso en áreas de bajo uso. Para resolver este problema los parques naturales se deben manejar con cercas y elementos que impidan la acción depredadora de los usuarios. Estudios realizados en parques en los Estados Unidos revelan que la erosión es mayor en los sitios de mayor uso o más cercanos a las zonas de presencia de humanos (Gardner y Burley, 1994).

10.9 CONTROL DE EROSIÓN EN RELLENOS DE RESIDUOS

Los rellenos de residuos presentan problemas especiales para el control de erosión y de sedimentación. Estos rellenos son muy complejos debidos especialmente a que se producen varios tipos de flujo:

- Flujo superficial sobre el relleno
- Flujo de infiltración hacia el relleno
- Flujo de lixiviados.

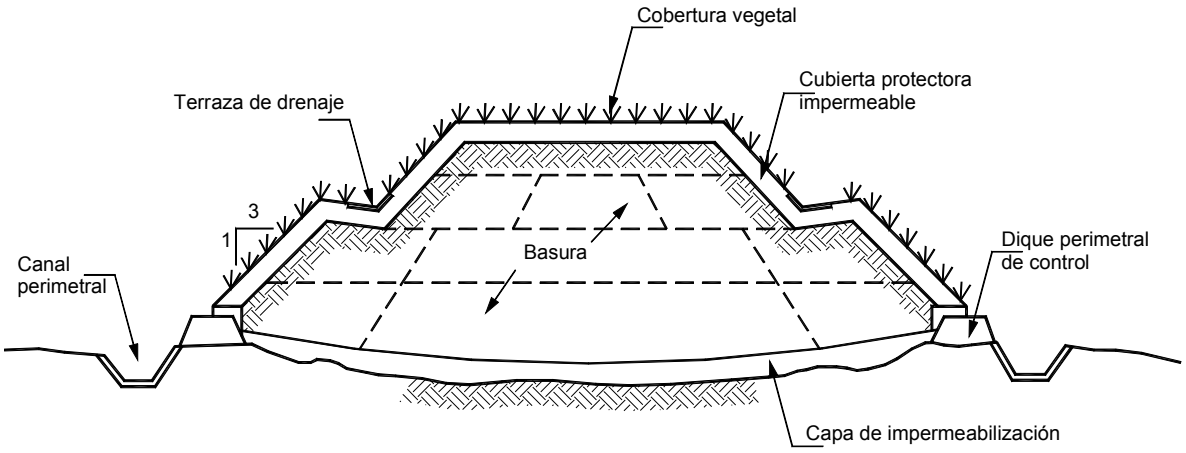
La evolución de los rellenos de residuos ha tenido como resultado el diseño de estándares relativamente sofisticados y las regulaciones ambientales cada vez más rigurosas. Entre los controles que debe tener un relleno sanitario se encuentra el diseño de la impermeabilización y de los controles estructurales y no estructurales para minimizar la erosión y capturar los sedimentos antes de que estos puedan salir del relleno.

Uno de los inconvenientes más difíciles de manejar es el diseñar sistemas de control y manejo cuando el tiempo de construcción del relleno puede durar veinte años o más. Esto significa que las obras se deben planear para ejecutarlas en el momento adecuado durante el desarrollo del relleno. Adicionalmente el monitoreo de los controles debe construirse en tal forma que ellos puedan ser operados durante la vida del relleno.

Partes del sistema de control de un relleno de residuos

En un relleno sanitario o de residuos se deben diseñar entre otros los siguientes elementos (Hattem, 1994):

- Impermeabilización del fondo del relleno.
- Muro o berma perimetral al relleno para controlar la salida de residuos o de agua contaminada
- Impermeabilización superior del relleno
- Refuerzo de la superficie superior del relleno.
- Capa de suelo encima de la impermeabilización para permitir el establecimiento de vegetación.
- Sistema de recolección del agua de escorrentía encima del relleno, la cual se considera que no está contaminada.
- Sistema para desvío de las aguas de escorrentía provenientes de áreas por fuera del relleno.
- Sistema de manejo de aguas para compensar el aumento de picos de escorrentía debidos a la instalación del relleno.
- Control de erosión de la superficie superior del relleno.
- Bermas para el manejo de aguas de escorrentía y control de estabilidad para movimientos en masa.



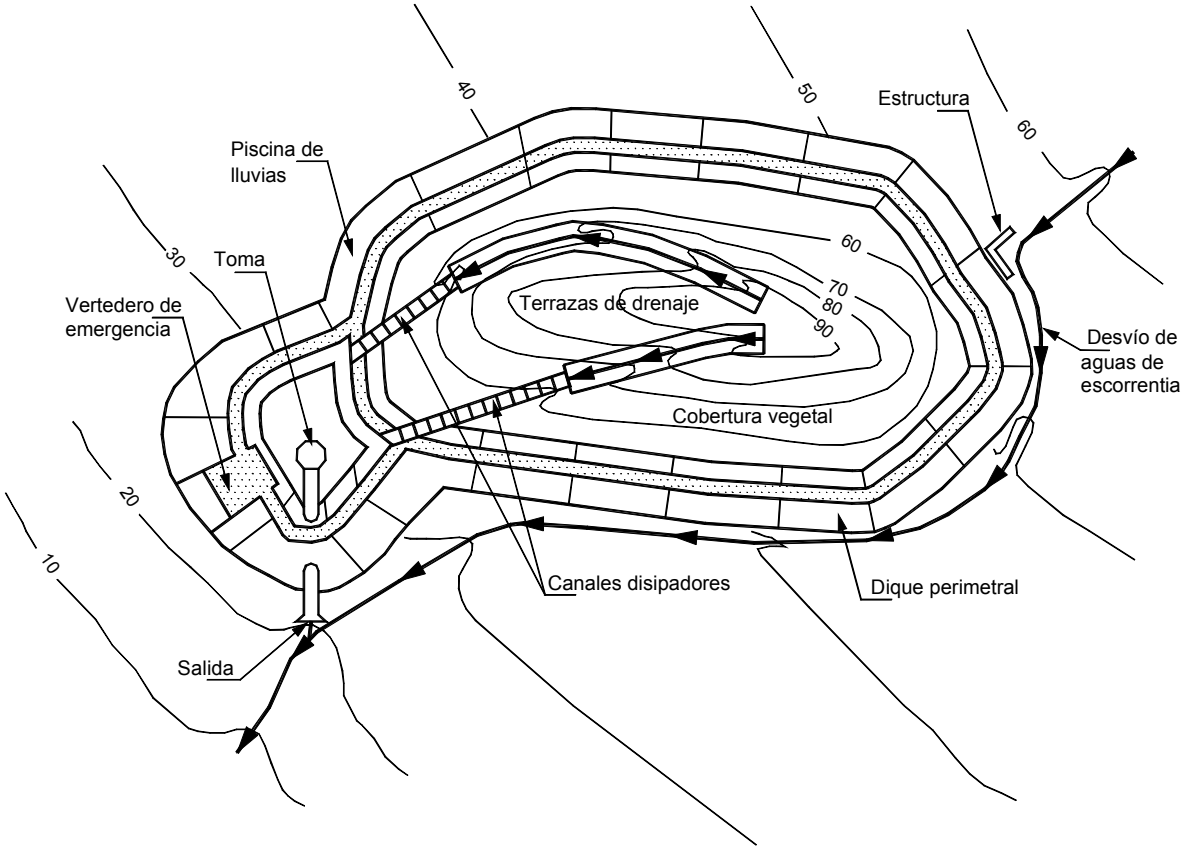


FIGURA 10.40 Esquema general de obras de control de erosión en un relleno sanitario.

- Planta de tratamiento de aguas de lixiviados provenientes del relleno.
- Sistema de manejo del gas metano producido por el relleno.

Represas de Sedimentación

En la parte baja del relleno se acostumbra colocar un dique para conformar una represa que actúa como sedimentador de las aguas recolectadas dentro del relleno pero que no corresponden a los lixiviados, esta agua pueden tener algo de contaminación de sólidos los cuales se requiere sedimentar para que no salgan de la zona del relleno. Adicionalmente el agua de escorrentía recolectada debe manejarse para disminuir los picos en el hidrograma de creciente de la cuenca en la zona cercana al relleno. Esta estructura debe tener un vertedero principal y un vertedero de emergencia.

La represa de sedimentación debe colocarse en la zona más baja del relleno y debe diseñarse un sistema para evitar que los lixiviados ingresen al embalse de sedimentación.

Conformación de taludes

Los taludes en un relleno sanitario generalmente están restringidos a una pendiente máxima 3H:1V. Adicionalmente a los taludes se acostumbra construir una serie de terrazas intermedias para el manejo de la

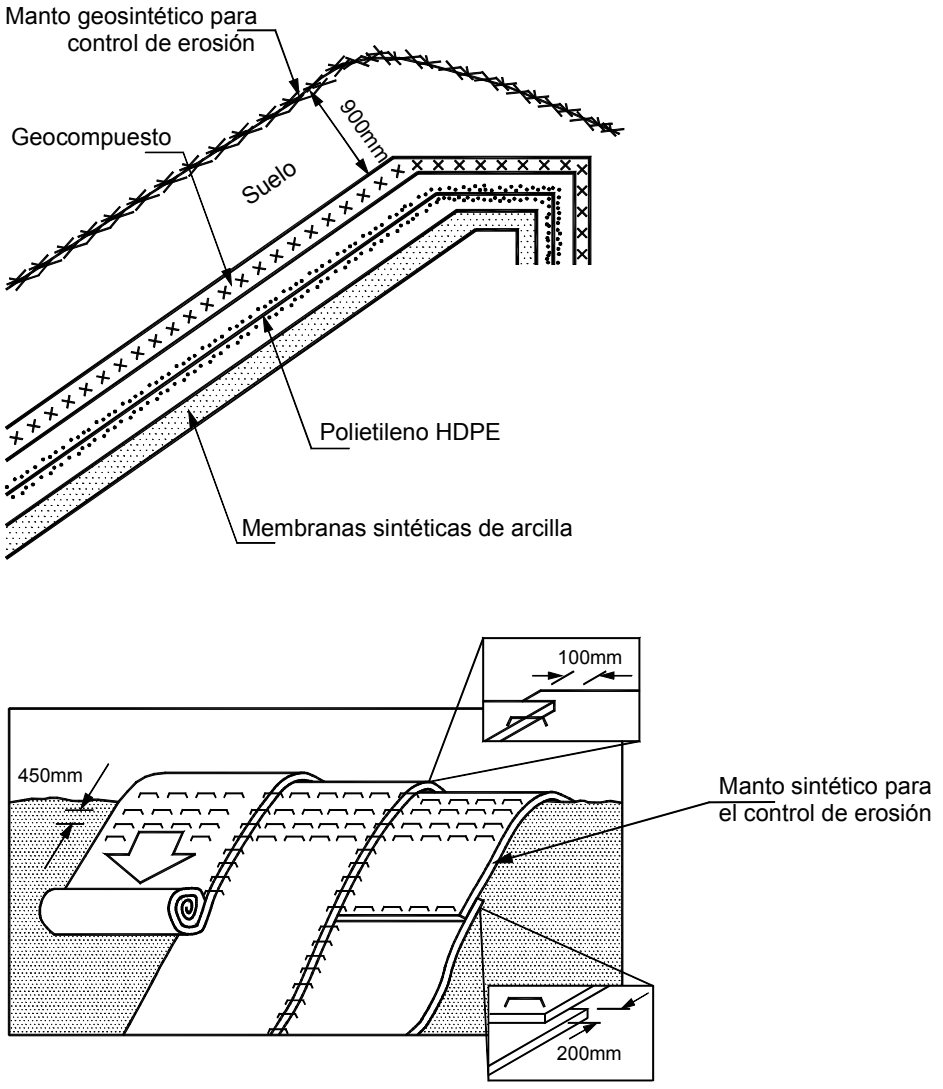


FIGURA 10.41 Esquema de la protección superficial de un relleno sanitario.

escorrentía y para garantizar la estabilidad de las masas de relleno. En estas terrazas se construyen canales revestidos para la conducción de las aguas recolectadas hacia vertederos. Generalmente las terrazas y canales se diseñan para manejar velocidades de agua de 0.6 a 1.3 m/seg. De acuerdo a la velocidad de diseño se requiere construir sistemas de revestimiento para controlar la erosión. Adicionalmente estos canales deben ser impermeabilizados para evitar que el agua recolectada pase al relleno y aumente el volumen de lixiviados (Collazos, 2001).

Finalmente se puede requerir la construcción de lavaderos o estructuras de disipación de energía que conduzcan el agua a la represa de sedimentación.

Protección de la superficie del relleno

La superficie del relleno debe protegerse con un sistema que debe incluir una malla de refuerzo, un sistema de impermeabilización, una capa de suelo para permitir el establecimiento de vegetación y el diseño de una cobertura vegetal resistente a la erosión (Figura 10.41).

El sistema de protección puede consistir en las siguientes capas (Koerner y Carson, 1998):

- Membrana sintética de arcilla sobre el relleno.
- Impermeabilización utilizando polietileno de alta densidad HDPE. Geocompuesto consistente en una geomalla entre dos capas de geotextil.
- Cobertura de suelo.
- Manto geosintético para el establecimiento de la vegetación y el refuerzo del suelo.

La cobertura tiene entre otras funciones evitar la infiltración del agua de escorrentía, por lo tanto, se debe impedir la formación de encharcamientos y retenciones de agua. El espesor de la cobertura de suelo depende de la pluviosidad. Esta capa de suelo puede variar entre 50 centímetros y 1.0 metro de espesor.

10.10 CONTROL DE EROSIÓN EN ZONAS RURALES

Las actividades agrícolas y ganaderas producen grandes volúmenes de erosión y generan gran cantidad de sedimentos. La deforestación y las prácticas agrícolas contribuyen con el mayor porcentaje de la erosión que se está produciendo en el mundo.
Existen algunas actividades rurales que contribuyen en forma extraordinaria a la erosión entre las cuales se cuentan:

1. La crianza de cabros (Goats) a campo abierto

Generalmente los cabros se crían en zonas semiáridas, extremadamente vulnerables a sufrir procesos de erosión y donde el establecimiento de vegetación es muy difícil. Los cabros impiden que la vegetación incipiente protectora pueda establecerse. En muchos países se encuentra prohibida la cría de cabros a campo abierto (Kostadinov, 1998) como medida preventiva para evitar problemas de erosión y avalanchas de tierra.

2. El sobrepastoreo en zonas ganaderas

La falta de una cultura de protección en el gremio de ganaderos permite la explotación excesiva y escasa en tecnología del suelo facilitando la erosión laminar en grandes extensiones de terreno.

3. La ganadería en áreas de alta pendiente o de vocación forestal

Se talan los bosques para el establecimiento de ganadería en zonas muy susceptibles a la erosión. Se forman grandes cárcavas de erosión al poco tiempo de destruida la vegetación nativa. Este caso es muy común en zonas de gran altitud en los Andes. No se debe permitir la ganadería en zonas de ladera con altitudes superiores a 1600 msnm.

Control de erosión en agricultura

Las prácticas agrícolas son responsables del mayor volumen de erosión que ocurre en el mundo. La utilización de técnicas inadecuadas de explotación agrícola puede producir problemas graves de erosión y sedimentación.
Algunas de las técnicas utilizadas para el manejo de erosión en agricultura son las siguientes:

1. Siembra en líneas de nivel

La siembra en surcos semihorizontales o de baja pendiente es una técnica muy utilizada en algunas plantaciones como el caso del café en Colombia, en esta forma la misma vegetación productora actúa como vegetación protectora.

TABLA 10.11 Métodos de Control de erosión en actividades agrícolas y ganaderas

Procedimiento	Objetivos	Características
Prohibición de la crianza de cabros a campo abierto.	Permitir el establecimiento y crecimiento de la vegetación nativa protectora.	Creación de programas para el cultivo industrializado de cabros y sustitución de la actividad caprina por actividades agrícolas.
Creación de zonas de amortiguación con bosques alrededor de las áreas ganaderas.	Controlar la erosión y mitigar la contaminación.	Zonas anchas de bosques alrededor de las zonas bajas, cañadas y cuerpos de agua.
Establecimiento de sistemas industrializados de cría de ganado.	Controlar la erosión y mitigar la contaminación.	Diseño de sistemas de producción ganadera con control estricto de los impactos ambientales.
Técnicas apropiadas de manejo de potreros.	Controlar la erosión evitando el sobrepastoreo.	Diseño de un sistema sostenible de rotación de potreros.
Prohibición de la ganadería en zonas de alta pendiente o dificultad de regeneración de la cobertura vegetal; y reforestación.	Controlar la erosión, evitar las avalanchas de tierra y conservar los ambientes frágiles y difíciles de recuperar.	Legislar, establecer programas de culturización y medidas de control para evitar que las zonas de ambientes frágiles sean deforestadas.
Siembra a lo largo de líneas de nivel (sembrar atravesado)	Controlar la erosión en surcos y cárcavas	Diseño de sistemas de cultivo, siguiendo las líneas de nivel y construyendo salidas de agua controladas con disipadores de energía.
Reforestación de las cañadas de drenaje efímero.	Controlar la erosión y la sedimentación y mitigar la contaminación.	Las zonas de bajos y cañadas no deben ser objeto de prácticas de agricultura y deben reforestarse.
Construcción de terrazas.	Controlar la erosión y estimular la infiltración.	Dentro de las zonas de cultivos debe construirse terrazas semiplanas alargadas.
Manejo de residuos de cultivos	Evitar la contaminación.	Los residuos deben colocarse en tal forma que ayuden a la regeneración de los suelos y eviten la contaminación de las aguas.
Creación de zonas de amortiguación.	Controlar la erosión y mejorar la calidad de las aguas	Al igual que en las zonas urbanas se deben formar zonas de amortiguación diseñadas para descontaminar el agua y permitir el desarrollo de fauna y flora propia de la zona.
Cordones de control de erosión.	Controlar la erosión laminar, en surcos y en cárcavas	Alrededor de cada una de las áreas de cultivo se debe construir zonas de vegetación baja, densa, utilizando especies no invasoras. (Ejemplo Vetiver). Estos cordones deben encerrar áreas generalmente no superiores a una hectárea.
Control de fondo de las cañadas y corrientes.	Evitar la erosión por profundización de los cauces.	Construir estructuras para mantener la pendiente y evitar la profundización (ver capítulo 2).

2. Utilización de hileras de pasto

Las hileras de pasto son barreras o filtros de pasto que no se extienden y que desarrollan una cobertura de tallos y raíces muy denso, un ejemplo es la utilización de Vetiveria Zizanoides. Estas barreras se colocan a espaciamientos que dependen de la pendiente del terreno, de la pluviosidad y de las propiedades del suelo.

3. Siembra en hileras de diferente vegetación

Una técnica utilizada en agricultura es la siembra de especies diferentes intercaladas en hileras en tal forma que unas especies actúan como barrera de protección contra la erosión junto a las otras especies. Generalmente se intercalan especies con alto riesgo de erosión junto a especies de bajo riesgo.

4. Siembra de áreas de amortiguación

Dentro de las áreas de explotación agrícola se pueden sembrar áreas anchas y alargadas de bosque altamente resistente a la erosión, en tal forma que estas cortinas actúan como grandes protectores de las áreas explotadas (Morgan y Rickson, 1995).

10.11 MANEJO DE CUENCAS PARA EL CONTROL DE EROSIÓN

El manejo de cuencas es un tema que ha tenido muchas interpretaciones. Cada profesional tiene su propia forma de interpretar los fenómenos que ocurren en la cuenca. Esto se debe a que la cuenca es un ente muy complejo, con muchas variables y muy difícil de interpretar (Terrene Institute 1996). La cuenca hay que conocerla y entenderla antes de intentar manejarla y en este conocimiento hay que tener en cuenta una gran cantidad de ciencias como la geología, la hidrología, la antropología, la botánica, zootecnia, etc.

Uno de los factores más importantes en una cuenca es el manejo del agua y uno de los elementos a tener en cuenta es el control de la erosión.

La escorrentía es tal vez la principal fuente de contaminación en una cuenca y dentro de estos contaminantes, los sedimentos representan un porcentaje importante de la contaminación.

Para entender el comportamiento de la cuenca se requiere entender el ciclo hidrológico y los factores que dentro de este ciclo afectan el comportamiento y la calidad del agua.

Para la planeación de un programa de manejo de cuencas debe tenerse una visión integral de todos los elementos que interactúan en la cuenca, identificar las áreas de recursos y los problemas.

Calidad del agua

La calidad del agua es afectada en forma negativa por los siguientes factores (Terrene Institute 1996):

1. Niveles elevados de nutrientes contaminantes como el Fósforo y el nitrógeno, el cual puede provenir de pozos sépticos, fertilizantes, disposición de residuos animales y vegetales.
2. Demasiada cantidad de sólidos como sedimentos, arcillas, limos, arenas y gravas, provenientes de erosión en carreteras, zonas cultivadas, zonas de ganadería y otras áreas no protegidas adecuadamente.
3. Presencia de elementos patógenos, como bacterias y virus provenientes del mal manejo de residuos animales y humanos.
4. Presencia de metales pesados como cobre, cadmio, zinc, mercurio, plomo y cromo provenientes de actividades industriales, mineras y otras actividades antrópicas.
5. Presencia de hidrocarburos, aceites, grasas y otros derivados del petróleo, provenientes de emisiones de vehículos, escapes de oleoductos y mal manejo de instalaciones industriales.
6. Elementos tóxicos orgánicos, como pesticidas.
7. Ácidos, como nitratos y sulfatos.
8. Sustancias húmicas. Materiales vegetales como pastos y hojas.
9. Niveles elevados de materia orgánica.
10. Basuras y elementos no biodegradables.
11. Bajos niveles de oxígeno disuelto.
12. Alteraciones de la temperatura del agua.

El deterioro de la calidad del agua genera impactos muy fuertes sobre la fauna y flora acuática y terrestre y sobre todo el componente ambiental.

Control de la erosión

La calidad del agua, y el habitat para la fauna y la flora son afectados directamente por el componente erosión y se requiere dentro de los planes de manejo de las cuencas establecer programas de control del elemento suelo, al igual que de los elementos agua, fauna, flora y humano.

En el manejo de cuencas se cuenta con una serie de herramientas, para el control de erosión de las cuales podemos enumerar las siguientes:

1. Prácticas no estructurales de manejo como planeación, y educación.

2. Prácticas estructurales como la construcción de obras para el manejo de aguas y control de erosión, como son:

- Presas y lagunas de regulación de agua.
- Creación de zonas húmedas en forma artificial.
- Estructuras de control y manejo de sedimentos.
- Prácticas de infiltración de agua.
- Revegetalización.
- Obras de control de erosión laminar en surcos y en cárcavas.

En todos los casos el manejo de una cuenca no es posible sin el manejo adecuado de las aguas y el control de la erosión.

REFERENCIAS

AASHTO (1982) "Highway Drainage Guidelines". Washington. 366 p.

AASHTO (1999) "Highway drainage guidelines". Washington D.C.

Armco (1959) "Manual de Drenaje y Productos de Construcción". The Armco Corporation – Chicago.

Armour T. (1998) "Continous Synthetic Thread Reinforced Soil Constructed In – Situ Provides Slope Protection and Earth Retention on Highway 4 Near Turner, Maine". Ieca Soil Stabilization Series, Vol 2, Methods and Techniques for Stabilizing Steep Slopes. p7.

Broda K. (2001) "Stablization of Steep Slope with Micro Soil Nails". Soil Stabilization Series, Vol 17, Slope Stabilization. p47.

California RWQCB-SFBR (1999) "Erosion and sediment control field manual" p132.

Carciente J.,García G., Serrano Z. (1981) " Drenaje de carreteras" . Manual de Estructuras típicas. Ediciones Vega, Caracas Venezuela. p231.

Carpenter T. (1999) "Silt fence that works" . Carpenter Erosion Control. p56.

CDMB - Hidroestudios Ltda. (1984) «Normas Técnicas para diseño de Alcantarillado.

Cedergren H.R. (1967) "Seepage, Drainage and Flow Nets". John Wiley, New York.

Choi E.C. (1983) "Seepage around horizontal drains in hill slopes". ASCE Journal of Hydraulic engineering. Vol. 109, No. 10,. pp. 1363 - 1368.

Collazos P.H. (2001) "Diseño y operación de rellenos sanitarios". Acodal. Bogotá. P 168.

Cook M. G., Hollifield J.F. (1998) " Erosion control on the Nantahala-Marble transmission line" IECA soil stabilization series. Vol. 6. Strategies and practices for making best management practices work.

Duffin M. (1998) "Steep Slope Protection at Snodland, Kent". IECA Soil Stabilization Series, Volume 2, Methods and Techniques for Stabilizing Steep Slopes. p8.

Duffy D. (1998), "Slope Stabilization with Retaining Walls". IECA Soil Stabilization Series, Volume 2, Methods and Techniques for Stabilizing Steep Slopes. p2.

Ecopetrol - Ingeniería y Geotecnia Ltda.(1990) "Manual de Protección Geotécnica y Ambiental". Oleoducto de Colombia S.A. - I.C.P. - 106 p.

Escario V. (1981) "Desmontes estado actual de la técnica". M.O.P.U. Dirección General de carreteras - Madrid.. 98 p.

García M., Amortegui J. - Vesga L. (1989) "Estudio Geotécnico de Oleoductos". Boletín Colombiano de Geotecnia. Vol. 1 No. 1 - Bogotá.

Gardner L.R.B., Burley J.B. (1994). "Alpine trail erosion in a Colorado wilderness area". IECA. Proceeding of Conference XXV. Reno Nevada. P 39-48.

Geotechnical Control Office, (1979), "Geotechnical Manual for slopes". Hong Kong, 306 p.

Geotechnical Control Office,(1984) "Geotechnical manual for slopes", Hong Kong.

Goff W. (1998) Rehabilitation of Cut Slopes, State Highway 40 West of Berthoud Pass. "IECA Soil Stabilization Series, Volume 2, Methods and Techniques for Stabilizing Steep Slopes". p9.

Hattem P.E., Dennis M. (1994) "E & S practices at landfills and npdes requirements". IECA. Proceedings of conference XXV. Reno Nevada. p 445-454

Herson-Jones L. M., Heraty M., Jordan B. (1995) "Riparian buffer strategies for urban watersheds". Metropolitan Washington Council of Governments. 96 p.

Highway Research Board (1973) "Erosion Control on Highway Construction". Synthesis of Highway Practice 18 - Washington -.

Hull P. (2001) Holding Back. "Soil Stabilization Series", Volume 17, Slope Stabilization p62.

IECA (1998) "Metal Panels Hold Soils to Vegetate walls and Other Steep Slopes". IECA Soil Stabilization Series, Volume 2, Methods and Techniques for Stabilizing Steep Slopes. p 10.

IECA (1998), "Gabions and Coir Mesh", IECA Soil Stabilization Series, Volume 2, Methods and Techniques for Stabilizing Steep Slopes. p1.

IECA Spring Report (1998) "Make the Most of Gridlock". IECA Soil Stabilization Series, Vol. 2, Methods and Techniques for Stabilizing Steep Slopes. p6.

Japan Road Association(1984) "Manual for Slope Protection" Tokyo 253 p.

Kaspersen J. (2001) "Shoring up the Soil". Soil Stabilization Series, Vol. 17, Slope Stabilization. P4.

Koerner G.R., Carson D.A. (1998). "Geosynthetic erosion control materials: a landfill cover field study". ASCE. Geotechnical special publication number 76. Geosynthetics in foundation reinforcement and erosion control systems. P 77-91.

Kostadinov S. (1998) "Evaluation of erosion and sediment control works in the repinska reka watershed". IECA Soil stabilization series: Vol 1. Methods and techniques for stabilizing channels and streambanks.

Kostielney J. (2001) "Retaining Walls Structural Protection." Soil Stabilization Series, Volume 17, Slope Stabilization. P17.

Mandal J. Shinde S. (1998) "CAD of Geogrid Reinforced Steep Slopes Using Back Wrapping Techniques". IECA Soil Stabilization Series, Volume 2, Methods and Techniques for Stabilizing Steep Slopes". p3.

McCullah J. (2001). "Biotechnical Soil Stabilization for Slopes and Streambanks". IECA Professional Development Course. Training Manual. Las Vegas. 177p.

Mejía F.F. (1999). "Hidrología e hidráulica". Manual para el control de la erosión. Corpocaldas. INVIAS. Manizales. Colombia. P 78-117.

Miller S.Howard T. (2001) "Geotechnical and Erosion Control Methods for Landslide Repair". Soil Stabilization Series, Volume 17, Slope Stabilization. P51.

Moreno G. (1974) "Drenaje y Subdrenaje en Obras Viales", Segundo Simposio Colombiano de Geotecnia, Bogotá.

Northcutt G. (1998) "Standing Up to Earthly Forces." Ieca Soil Stabilization Series, Volume 2, Methods and Techniques for Stabilizing Steep Slopes . P5.

Northcuttt G. (2001) "Controlling the Hazards of Rock and Roll." Soil Stabilization Series, Volume 17, Slope Stabilization p23.

O'Malley P. (2001) "Slope Stabilization The Whole is More Than the Sum of Its Parts." Soil Stabilization Series, Vol. 17, Slope Stabilization. P70.

Oglesby G.H. (1975) "Highway Engineering" J. Wiley .

Rodencal J. (1998) "Erosion Control Systems for Mechanically Stabilized Earth (MSE) Slope Structures". Ieca Soil Stabilization Series, Volume 2, Methods and Techniques for Stabilizing Steep Slopes. P.4

Roth T. (2001) "Slope Stabilization Case Studies". Soil Stabilization Series, Volume 17, Slope Stabilization. P77.

Scullin C.M. (1983) "Excavation and Grading Code", Prentice Hall - New Jersey. 405p.

Secretaria de Obras Públicas de Antioquia (1985). "Obras de drenaje y protección para carreteras". Medellín.

Sell C. (2001) Retaining Walls in the Urban Infrastructure. "Soil Stabilization Series, Volume 17, Slope Stabilization". p9.

Sotir R. (2001) "Slope Stabilization and Restoration." Soil Stabilization Series, Volume 17, Slope Stabilization. P32.

Stelter P. (2001) "Kressview Springs Puts Condominius on a Firmer Footing." Soil Stabilization Series, Vol. 17, Slope Stabilization. p1.

Suárez J (1998) "Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales", Ediciones UIS, Bucaramanga – Colombia 548 p.

Terrene Institute (1996) "A watershed approach to urban runoff". Handbook for decisionmakers. Washington D.C. 115 p.

Torres Herrera F. (1983) "Obras Hidráulicas". Limusa - Mexico.

Tranportation Research Board (1980) "Erosion cintrol during highway construction". Manual on principles and practices. Highway research program report 221. Washington.

TRRL (1992) "A design manual for small bridges". Overseas road note 9. Transport and road research laboratory overseas

Wolcott B. (2001) "Flexible Barriers for Debris Flow". Soil Stabilization Series, Volume 17, Slope Stabilization. p25.

Zellmer S., Edgar D. and Isaacson H. (1998) "Erosion Control on a Steeply Sloped Pipeline Right-of-Way in Southwesterne Pennsylvania". IECA Soil Stabilization Series, Volume 2, Methods and Techcniques for Stabilizing Steep Slopes. P12.